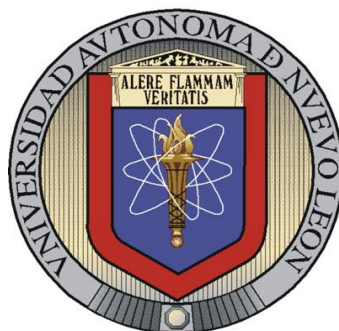


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CONTADURÍA PÚBLICA Y ADMINISTRACIÓN
División de Estudios de Posgrado



**MODELO DE OPTIMIZACIÓN DE LA
SECUENCIACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE
COMPONENTES AUTOMOTRICES DE NUEVO LEÓN**

Tesis Doctoral presentado por:

ANA VERÓNICA RODRÍGUEZ PARRAL

Como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN FILOSOFÍA CON ESPECIALIDAD EN ADMINISTRACIÓN

Monterrey, México.

Agosto, 2020

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CONTADURÍA PÚBLICA Y ADMINISTRACIÓN
DIVISIÓN DE POSTGRADO

Comité doctoral de Tesis

MODELO DE OPTIMIZACIÓN DE LA SECUENCIACIÓN DE LA PRODUCCIÓN
DE COMPONENTES AUTOMOTRICES DE NUEVO LEÓN

APROBACIÓN DE LA TESIS:

Dr. Jesús Fabián López Pérez
Presidente

Dr. Jesús Gerardo Cruz Álvarez
Secretario

Dr. Joel Mendoza Gómez
Vocal 1

Dra. Mónica Blanco Jiménez
Vocal 2

Dr. Bernardo Villarreal Celestino
Vocal 3

Monterrey N.L. México.

Agosto, 2020

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Declaro solemnemente que el documento que en seguida presento es fruto de mi propio trabajo, y hasta donde estoy enterado no contiene material previamente publicado o escrito por otra persona, excepto aquellos materiales o ideas que por ser de otras personas les he dado el debido reconocimiento y los he citado debidamente en la bibliografía o referencias.

Declaro además que tampoco contiene material que haya sido aceptado para el otorgamiento de cualquier otro grado o diploma de alguna universidad o institución.

Nombre: Ana Verónica Rodríguez Parral

Firma: _____

Fecha: _____

DEDICATORIA

A Dios, por permitirme llegar a etapa de mi vida y que la concluyo de manera exitosa.

A mis padres el Ing. Juan Alfonso Rodríguez Sánchez y Sra. Verónica Parral Sánchez, por apoyarme en todos mis retos y tener las palabras de aliento correctas, cuando más lo necesito.

Al Ing. Daniel Cerón Velázquez, quien es mi mejor amigo y es un ejemplo a seguir por su espíritu de lucha y perseverancia, gracias por todo, pero sobre todo al hacerme sentir como un miembro de su familia.

A mis amigos de la Universidad de Monterrey, Ing. Miguel Ángel Cantú Soto e Ing. Edgar Eduardo Cantú Soto e Hipólito Ortiz Rodríguez (Don Polo), por darme ánimos en esta aventura y principalmente por su amistad.

A mis alumnos que siempre me han visto como un apoyo; ya sea en clases, proyectos e incluso en su vida profesional.

AGRADECIMIENTOS

En la realización de esta investigación tuve la fortuna de contar con la enseñanza y apoyo extraordinario de mi directo de tesis Dr. Jesús Fabián López Pérez, por su dedicación, esfuerzo y profesionalismo para orientarme en todo momento y ayudarme a superar aquellos obstáculos que se presentaron en la realización de esta investigación y por enseñarme a retarme intelectualmente e ir más allá de mis límites.

A mi comité Doctoral:

Dr. Jesús Gerardo Cruz Álvarez, por todo su apoyo y asesoría para lograr cumplir con los requerimientos necesarios para poder culminar con éxito este proyecto

Dra. Mónica Blanco Jiménez, por sus valiosas sugerencias e interés en la revisión de mi investigación.

Dr. Joel Mendoza Gómez, gracias por sus consejos y orientaciones académicas.

Dr. Bernardo Villarreal Celestino, por ser ejemplo a seguir en vida, por su pasión, entrega y dedicación al desempeñarse como profesor de profesional y posgrado en la UDEM, le agradezco haberme acompañado en esas etapas y sobre todo haber sido el asesor de mis tesis.

Dr. Miguel Ángel Palomo González (+), quien lamentablemente no pudo acompañarme en la culminación de esta etapa importante de mi vida, por ser el primer doctor que conocí en el CEDEEM, quien me aconsejó y me guió desde antes del inicio de este proyecto, de manera profesional y personal.

A mis compañeros de generación Carlos Landeros, Jesús Martínez y Lidia Mercado por el intercambio de ideas, pero sobre todo por su amistad.

A la Universidad de Monterrey, en especial al Dr. José Benito Flores Juárez y Dr. Demófilo Maldonado Cortés, quienes creyeron en mí y me apoyaron para la obtención de mi beca para los estudios doctorales.

A la empresa Daimler Mercedes Benz, por abrirme las puertas al permitirme estudiar su proceso de manufactura y poder generar una propuesta de mejora para las líneas de ensamble de camiones pesados, en especial al Ing. Luciano Pérez, Ing. Mauricio Guajardo, Ing. Israel Flores, Ing. Raúl García e Ing. Diego Urbina, mi eterna gratitud.

ABREVIATURAS y TERMINOS TECNICOS

AMIA: Asociación Mexicana de la Industria Automotriz.

INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía

JIT: Justo a Tiempo (Just in Time).

JIS: Justo en Secuencia (Just in Sequence).

OICA: International Organization of Motor Vehicle Manufacturers.

PIB: Producto Interno Bruto.

Layout: Distribución de planta Lean Manufacturing: Manufactura Esbelt

Muda: Desperdicios.

SE: Secretaría de Economía

Setup: Tiempo de paro

Takt time: Takt, en alemán, significa entre otras cosas ritmo, compás. Es el ritmo el cual se fabrica un producto para satisfacer la demanda del cliente.

Contenido

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD.....	iii
ABREVIATURAS y TERMINOS TECNICOS.....	4
ÍNDICE DE FIGURAS	10
ÍNDICE DE GRÁFICAS.....	11
RESUMEN	12
INTRODUCCIÓN.....	13
CAPITULO 1. NATURALEZA Y DIMENSION DEL ESTUDIO	15
1.1 Antecedentes del Problema a Estudiar	15
1.1.1 Hechos actuales que contextualizan el problema.....	15
1.1.1.2 Indicadores globales de la Industria Automotriz (Producción)	18
1.1.1.3 Industria Automotriz Mexicana.....	19
1.1.1.4 Industria Automotriz de Nuevo León	23
1.1.2 Causas y consecuencias del problema a estudiar	24
1.1.3 Mapa Mental del planteamiento del problema	25
1.2 Planteamiento Teórico de Problema de Investigación	26
1.2.1 Teorías de fenómeno a estudiar (variable dependiente).....	26
1.2.2 Relación teórica y aplicada de las variables independientes con la dependiente	27
1.3 Pregunta Central de Investigación	31
1.4 Objetivo General de la Investigación.....	32
1.4.1 Objetivo Metodológicos de la Investigación	32
1.5 Hipótesis General de Investigación	32
1.6 Metodología	33
1.7 Justificación y Aportaciones del Estudio	33
1.8 Delimitaciones del Estudio	34
CAPÍTULO 2.- MARCO TEÓRICO	35
2.1 Marco Teórico de la variable dependiente (Secuenciación de la Producción)	39
2.1.2 Métodos de Optimización de la Secuenciación de la Producción.....	40
2.2. Marco Teórico y estudios aplicados de las variables independientes	50
2.2.1 Capacidad Instalada	50
2.2.2 Inventario en Proceso.....	58

2.2.3 Tamaños de Lotes	65
2.2.4 Takt Time	70
2.2.5 Mezcla de Productos	78
2.2.6 Tiempo de Ciclo	81
2.2.7 Tiempo de Operación	88
2.2.8 Cuellos de Botella	97
2.2.9 Tiempos de Paro	107
2.2.10 Generación de Desperdicios (Retrabajos).....	113
2.3 Hipótesis Operativas o Específicas	118
2.3.1 Modelo gráfico de la hipótesis	120
2.3.2 Modelo de Relaciones teóricas con las hipótesis	121
CAPITULO 3. ESTRATEGIA METODOLÓGICA	124
3.1 Tipo y Diseño de la Investigación	124
3.1.1 Tipos de Investigación	125
3.1.2 Diseño de la Investigación	126
3.2 Métodos de Recolección de Datos	128
3.2.1 Funcionamiento del Modelo estadístico PROMODEL	128
3.2.2 Aplicación del Software en la empresa de camiones pesados.....	133
3.2.3 Validez de Contenido.....	138
3.3 Número de réplicas	139
3.4 Sujetos de Estudio	140
CAPITULO 4 ANALISIS DE RESULTADOS.....	141
4.1. Análisis cualitativo (Análisis con expertos).....	141
4.2 Prueba Piloto	141
4.2.1 Resultados de la prueba piloto.....	144
4.3 Resultados finales.....	155
4.3.1 Análisis estadístico	155
4.3.1.1 Superficie de Respuesta	161
4.3.1.2 Optimización de las Variables	164
4.3.1.3 Costos	166
CONCLUSIONES Y RECOMENTADACIONES.....	168

Anexos	173
Bibliografía.....	180

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Producción y Venta por Tipo de Vehículos a Nivel Mundial.....	16
Tabla 2 Producción mundial de Vehículos por País.....	18
Tabla 3 Resultados.....	28
Tabla 4 Resultados de la Simulación	29
Tabla 5 Resultados de la Simulación	31
Tabla 6 Resultados de la Simulación	53
Tabla 7 Resultados de la simulación.....	56
Tabla 8 Resultados de la simulación.....	76
Tabla 9 Resultados de la simulación.....	76
Tabla 10 Diseño de experimento con sus factores y niveles.....	77
Tabla 11 Resultados de la simulación.....	83
Tabla 12 Resultados de la simulación.....	92
Tabla 13 Resultados de la simulación.....	94
Tabla 14 Resultados de la simulación.....	101
Tabla 15 Resultados método de la regla más grande	103
Tabla 16 Resultados método Kilbridge y Wester	103
Tabla 17 Comparación de los Métodos.....	104
Tabla 18 Resultados de la simulación.....	105
Tabla 19 Resultados de la simulación.....	111
Tabla 20 Diferencia entre simulación y prototipo.....	115
Tabla 21 Softwares de Optimización en Simuladores Comerciales	132
Tabla 22 Operacionalización de las Variables	135
Tabla 23 Factores de entrada y sus niveles prueba Piloto	143
Tabla 24 Resumen de los resultados de SPSS Prueba de Medias (Prueba Piloto).....	144
Tabla 25 Resumen de la prueba de hipótesis aceptadas y su valor P-value	145
Tabla 26 Coeficientes de determinación del modelo resultado SPSS.....	146
Tabla 27 Coeficientes de β SPSS para Piezas Terminadas (Y1).....	147
Tabla 28 Coeficientes de β SPSS para la variable Tiempo de Finalización (Y2)	149
Tabla 29 Coeficientes de β SPSS para % de Utilización de las estaciones (Y3).....	151
Tabla 30 Resumen de las hipótesis aceptadas y rechazadas de la variable dependiente	153
Tabla 31 Resumen de las hipótesis aceptadas y rechazadas de la variable dependiente	154
Tabla 32 Resumen de las hipótesis aceptadas y rechazadas de la variable dependiente	155
Tabla 33 Factores de Entrada y sus niveles	156
Tabla 34 Coeficientes de determinación del modelo resultados en SPSS	157
Tabla 35 Coeficientes de β SPSS para la variable dependiente.....	157
Tabla 36 Coeficientes de β SPSS para la variable dependiente.....	159
Tabla 37 Coeficientes de β SPSS para la variable dependiente.....	160
Tabla 38 Optimización Solver Vs Promodel.....	164

Tabla 39 Actual Vs Óptimo	165
Tabla 40 Actual Vs Óptimo	166
Tabla 41 Actual Vs Óptimo	166
Tabla 42 Resumen de hipótesis aceptadas y rechazadas.....	172

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ranking de los principales productos de vehículos a nivel global.....	21
Figura 2 Ranking de los principales productos de autopartes a nivel global	22
Figura 3 Mapa Mental	25
Figura 4 Resultados de la simulación	58
Figura 5 Resultados de la simulación	65
Figura 6 Flujo del proceso simulado.....	71
Figura 7 Estaciones de Trabajo con sus respectivos Takt's Time	72
Figura 8 Modelo simulado.....	84
Figura 9 Resultados de la simulación	87
Figura 10 Resultados de la simulación	88
Figura 11 Secuencia y tiempo de procesamiento	95
Figura 12 Trabajos y tiempos de procesamiento	95
Figura 13 Resultados	96
Figura 14 Layout de Planta	99
Figura 15 Modelo de Setup	108
Figura 16 Estaciones de trabajo y tiempo de ciclo.....	112
Figura 17 Parámetros	112
Figura 18 Modelo de Simulación	142

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1 Ventas de Vehículos a Nivel Mundial.....	17
Gráfica 2 Ventas de Vehículos en México	23
Gráfica 3 Eficiencia en la línea de Producción.....	86
Gráfica 4 Tiempo total de operación en Horas	90
Gráfica 5 Resultados de las Encuestas	117
Gráfica 6 Superficie de respuesta Piezas Terminadas (Y1).....	162
Gráfica 7 Superficie respuesta tiempo de finalización (Y2).....	163

RESUMEN

La presente investigación está enfocada al proceso productivo de ensamble de camiones pesados de la industria automotriz, se va analizar el impacto de las variables, en la secuenciación de la producción, las cuales fueron obtenidas de los estudios a nivel mundial y nacional que han hecho estudios al respecto, pero se quieren ahora validar a nivel Nuevo León, con este estudio también se desea validar como los indicadores productivos y financieros son afectados con las variables previamente investigadas, analizas y operacionalizadas.

INTRODUCCIÓN

La industria automotriz mexicana, en los últimos años se ha caracterizado por ser un país productor y exportador; siendo uno de los sectores más productivos de la economía mexicana. Esto lo ha colocado como un centro de atracción para la inversión extranjera.

Al invertir en el país, se genera el desarrollo y competitividad de las regiones, además de ser una fuente de empleo.

Al ser un país productor, se deben cumplir con los estándares de calidad y exigencias de los mercados internacionales, donde la variabilidad de los productos se hace presente, esto ha hecho que a nivel mundial surjan el problema de la secuenciación de la producción, donde se tiene determinado número de máquinas y capacidades, las cuales tienen que producir automóviles con diferentes características para los clientes, sin embargo debido a estas restricciones los procesos productivos se deben ajustar para poder producir a tiempo y al gusto de los clientes.

Para llevar a cabo este estudio se hará una revisión exhaustiva de literatura existente, donde se definirán las variables que optimicen los procesos productivos automotrices secuenciados y en base a estos se validarán por medio de la simulación, análisis de regresión multivariable y la optimización. Comparando como estos resultados afectaron a los indicadores productivos y financieros.

En el capítulo 1 se presentan los antecedentes del problema, así como el planteamiento del problema de la investigación, la pregunta central de investigación, objetivo general de la investigación, metodología, justificación y aportaciones del estudio y sus delimitaciones.

En el capítulo 2 se muestra las teorías que se revisaron para identificar las variables que se van utilizar en este estudio en base a los autores que han escrito sobre el tema de secuenciación de la producción, con estos estudios se definieron las variables y sus definiciones a utilizar, así como también se definió la hipótesis a comprobar, la cual se formuló en base a los estudios empíricos revisados.

En el capítulo 3 se diseña la estrategia metodológica en la cual se va a definir qué tipo de método es el adecuado para obtener los datos, el cómo medirlos e interpretarlos, así como también el sujeto de estudio de esta investigación

En el capítulo 4 se desarrolla el análisis de los datos obtenidos del modelo y se optimizaran los valores.

Por último se presenta el apartado de conclusiones y recomendaciones.

CAPITULO 1. NATURALEZA Y DIMENSION DEL ESTUDIO

En este capítulo se va a tratar los siguientes apartados: antecedentes del problema a estudiar, planteamiento teórico del problema de investigación, pregunta central de investigación, objetivo general de la investigación, hipótesis general de la investigación, metodología, justificación y aportaciones del estudio, matriz de congruencia.

1.1 Antecedentes del Problema a Estudiar

1.1.1 Hechos actuales que contextualizan el problema

La industria automotriz es una de las industrias internacionales más competitiva, ya que genera y exporta vehículos a nivel mundial. De acuerdo a Bertoncetto et al (2015), menciona que es una de las industrias más importantes para la economía global. Esta industria es la que cuenta con las mejores prácticas tecnológicas invirtiendo más de 84 mil millones de Euros anualmente, en la investigación desarrollo y producción. (OICA, 2017).

La producción mundial de vehículos muestra una tendencia creciente a lo largo de los últimos 20 años y se espera que esta tendencia se mantenga hasta 2025. De ser así, para el año 2020 la manufactura de vehículos en los países emergentes en particular se acercará al volumen de producción de los países desarrollados. Para entonces, se producirán a nivel mundial más de 112 millones de unidades, de las cuales 47% se fabricarán en los mercados emergentes (India, Brasil, México, entre otros) y el restante 53% en los mercados desarrollados (China, EEUU, Japón, Alemania y Corea del Sur). (Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva, 2014).

Debido a los costos de mano de obra, infraestructura y regulación de las leyes de los países emergentes, los fabricantes automotrices se están estableciendo cada vez más en estos países, esto con el fin de reducir sus costos productivos.

La industria automotriz internacional está segmentada por dos sectores: terminal y autopartes, donde la industria terminal se divide a su vez en: vehículos ligeros y vehículos pesados, estas definiciones a nivel mundial son utilizadas por la Organización Internacional de Constructores de Automóviles (OICA, 2017)

A continuación se presentan las definiciones proporcionadas por OICA (2017):

Vehículos ligeros

Vehículos de motor utilizados para el transporte de pasajeros que no contienen más de ocho asientos (incluido el del conductor).

Vehículos pesados

Vehículos utilizados para el transporte de mercancías; su peso es mayor a 7 toneladas.

Este estudio se basa en el caso de vehículos pesados.

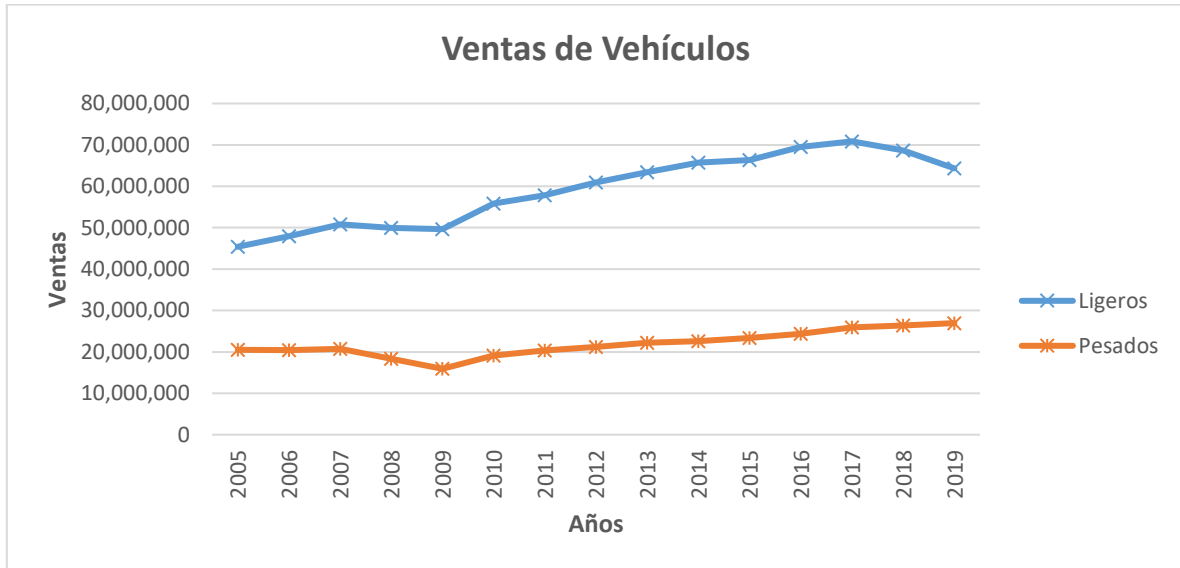
En la tabla 1 se muestra la producción y el porcentaje de producción a nivel mundial, donde se ve claramente que la producción mayormente es de vehículos ligeros, por lo tanto las ventas son las que presentan mayor participación.

Tabla 1 Producción y Venta por Tipo de Vehículos a Nivel Mundial

2019				
Tipo de Vehículos	Producción	%	Ventas	%
Ligero	67,149,196	94%	64,341,693	70%
Pesados	4,142,806	6%	26,955,045	30%
Total	71,292,002	100%	91,296,738	100%

Fuente: Elaboración Propia con Datos de OICA 2019

Gráfica 1 Ventas de Vehículos a Nivel Mundial



Fuente: Elaboración Propia con Datos de OICA 2019

En la gráfica 1, se puede visualizar que en el año 2017 hubo una producción total de 96 millones de vehículos a nivel mundial de los cuales el 73% fueron vehículos ligeros y el 27% vehículos pesados. Así como también se puede apreciar que a partir de ese año, las ventas de vehículos ligeros empezaron a decaer debido a una recesión económica mundial, por otra parte se puede ver que las ventas de los vehículos pesados se mantienen constante.

1.1.1.2 Indicadores globales de la Industria Automotriz (Producción)

Tabla 2 Producción mundial de Vehículos por País

Producción de Vehículos 2019 Por País						
Pais	Vehiculos Ligeros	% Vehiculos Ligeros	Vehiculos Pesados	% Vehículos Pesados	Total	% Cambio
China	21,360,193	31.72%	4,360,472	17.65%	25,720,665	-7,5
México	1,382,714	2.05%	2,604,080	10.54%	3,986,794	-2,8
Canadá	461,370	0.69%	1,455,215	5.89%	1,916,585	-5,4
Japan	8,328,756	12.37%	1,355,542	5.49%	9,684,298	-0,5
India	3,623,335	5.38%	892,682	3.61%	4,516,017	-12,2
Spain	2,248,019	3.34%	574,336	2.33%	2,822,355	0,1
France	1,675,198	2.49%	527,262	2.13%	2,202,460	-2,9
Brazil	2,448,490	3.64%	496,498	2.01%	2,944,988	2,2
Italy	542,007	0.80%	373,298	1.51%	915,305	-13,8
South Korea	3,612,587	5.36%	338,030	1.37%	3,950,617	-1,9
South Africa	348,665	0.52%	283,318	1.15%	631,983	3,5
Indonesia	1,045,666	1.55%	241,182	0.98%	1,286,848	-4,2
Poland	434,700	0.65%	215,164	0.87%	649,864	-1,5
Argentina	108,364	0.16%	206,423	0.84%	314,787	-32,5
Russia	1,523,594	2.26%	196,190	0.79%	1,719,784	-2,8
Portugal	282,142	0.42%	63,562	0.26%	345,704	17,4
Taiwan	189,549	0.28%	61,755	0.25%	251,304	-0,8
Iran	770,000	1.14%	51,060	0.21%	821,060	-0.25
Belgium	247,020	0.37%	38,777	0.16%	285,797	-7,4
Malaysia	534,115	0.79%	37,517	0.15%	571,632	1,2
Morocco	360,110	0.53%	34,542	0.14%	394,652	-1,8
Austria	158,400	0.24%	21,000	0.09%	179,400	8,8
Czech Rep.	1,427,563	2.12%	6,400	0.03%	1,433,963	-0,6
Egypt	18,500	0.03%	0	0.00%	18,500	0
Finland	114,785	0.17%	0	0.00%	114,785	2,5
Germany	4,661,328	6.92%	0	0.00%	4,661,328	-9
Hungary	498,158	0.74%	0	0.00%	498,158	7,6
Romania	490,412	0.73%	0	0.00%	490,412	2,9
Serbia	34,985	0.05%	130	0.00%	35,115	-37,8
Slovakia	1,100,000	1.63%	0	0.00%	1,100,000	0,6
Slovenia	199,102	0.30%	0	0.00%	199,102	-4,9

Others	7,108,918	10.56%	10,264,985	41.56%	17,373,903	-7,1
Total	67,338,745	100.00%	24,699,420	100.00%	92,038,165	-5,7

Fuente: Elaboración Propia con Datos de OICA 2019

Como podemos observar en la tabla 2, México se encuentra entre los primeros lugares de producción de vehículos pesados.

1.1.1.3 Industria Automotriz Mexicana

Dombois (Citado en Vicencio, 2007). Entre los años de 1925-1960 los fabricantes norteamericanos iniciaron el traslado de sus centros de fabricación automotriz a los países emergentes entre ellos México, posteriormente le siguieron los mercados europeos y asiáticos, teniendo en cuenta las siguientes razones:

- 1) Reducción de los costos de producción. En virtud de que los costos de importación de juegos CKD (Completely Knocked Down) usados para el ensamble eran menores a los pagados por la importación de vehículos.
- 2) Bajos costos de transporte.
- 3) Bajos salarios. Principalmente en la mano de obra usada en tareas de montaje.
- 4) Expectativas de un mercado factible de monopolizar.

La industria automotriz es una de las más dinámicas y competitivas de México y se ha consolidado como un líder importante del sector a nivel global. En las últimas décadas, México ha ocupado un lugar importante dentro del sector automotriz debido al crecimiento sostenido en la producción de vehículos y autopartes. Actualmente la industria automotriz mexicana vuelve a ser el centro de atención de la escena global, debido a su posicionamiento geográfico, contando con una mano de obra calificada y competitiva.

La historia de la industria automotriz en México data de 1925 con la instalación de las líneas de ensamble de Ford, cuyo desarrollo en Estados Unidos se incrementaba notablemente; posteriormente, en 1935 llega la que a la postre se convertiría en el mayor fabricante de vehículos en el nivel mundial: General Motors. En 1938 inicia operaciones Automex que posteriormente se convertiría en Chrysler. Todas ellas centraron su actividad operacional en el montaje de vehículos destinados al mercado local que anteriormente satisfacía su demanda con importaciones. (Vicencio, 2007).

La característica principal en todas las plantas automotrices del año 1925 era que se trabajaba con un nivel de productividad bajo, resultado de mínimas inversiones y falta de infraestructura. Es hasta después de la Segunda Guerra Mundial cuando el gobierno orienta sus esfuerzos hacia la industrialización del país; ya para 1950 México da un giro en su estructura económica hasta ese entonces dependiente de la agricultura y adquiere un enfoque pleno hacia el desarrollo industrial. Situación que como se verá posteriormente fortaleció en gran medida al sector automotriz.

La Asociación Mexicana de la Industria Automotriz (AMIA, 2016), reconoce la relevancia de la industria automotriz como motor del crecimiento de la economía del país. En 2017 el sector aportaba más de 3% del Producto Interno Bruto (PIB) nacional y 18% del PIB manufacturero, generando divisas por más de 52,000 millones de dólares al año y era responsable de alrededor de 900,000 empleos directos en todo el país. Con estos indicadores, México es el séptimo productor y el cuarto exportador de vehículos ligeros a nivel global. Para el caso de los camiones pesados México ocupa el cuarto lugar como productor y sexto exportador.

En la figura 1. Se puede observar a México por tercer año consecutivo ocupando el 7º lugar del ranking como productor de vehículos a nivel global, superando a países como España, Brasil y Francia. Siendo los primeros lugares ocupados por China, Estados Unidos y Japón. Ranking (OICA, 2017)

Figura 1 Ranking de los principales productos de vehículos a nivel global

PRODUCCIÓN MUNDIAL DE VEHÍCULOS*

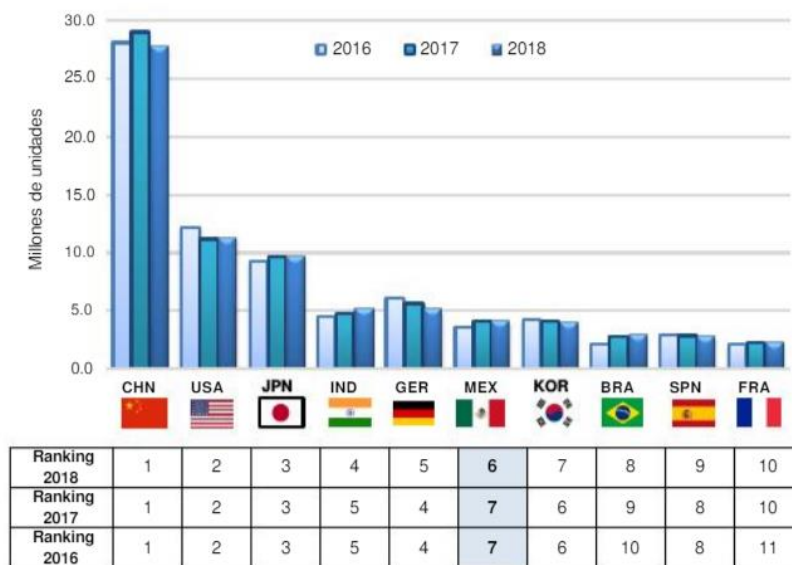
(millones de unidades)

Ranking 2018	País		2016	2017	2018	Variación		Participación
						%	absoluta	
1	China		28.1	29.0	27.8	-4.2%	-1.21	29.2%
2	Estados Unidos		12.2	11.2	11.3	1.1%	0.12	11.9%
3	Japón		9.2	9.7	9.7	0.4%	0.04	10.2%
4	India		4.5	4.8	5.2	8.0%	0.38	5.4%
5	Alemania		6.1	5.6	5.1	-9.3%	-0.53	5.4%
6	México		3.6	4.1	4.1	0.1%	0.01	4.3%
7	Corea del Sur		4.2	4.1	4.0	-2.1%	-0.09	4.2%
8	Brasil		2.2	2.7	2.9	5.2%	0.14	3.0%
9	España		2.9	2.8	2.8	-1.0%	-0.03	3.0%
10	Francia		2.1	2.2	2.3	1.6%	0.04	2.4%
	Otros países		20.5	20.2	20.1	-0.4%	-0.08	21.1%
	Producción mundial		95.6	96.6	95.4	-1.2%	-1.20	100.0%

Fuente: elaborado por AMIA con datos de OICA. * Incluye vehículos pesados.

En la figura 2, se puede apreciar como México alcanzó en el 2018 una producción de vehículos (se incluyen ligeros y pesados) de 4.1 millones de unidades, lo que lo sitúa en el sexto lugar, superando a Corea del Sur, quien ocupa una séptima posición, mientras que Alemania con 5.1 millones, se mantiene en el quinto sitio.

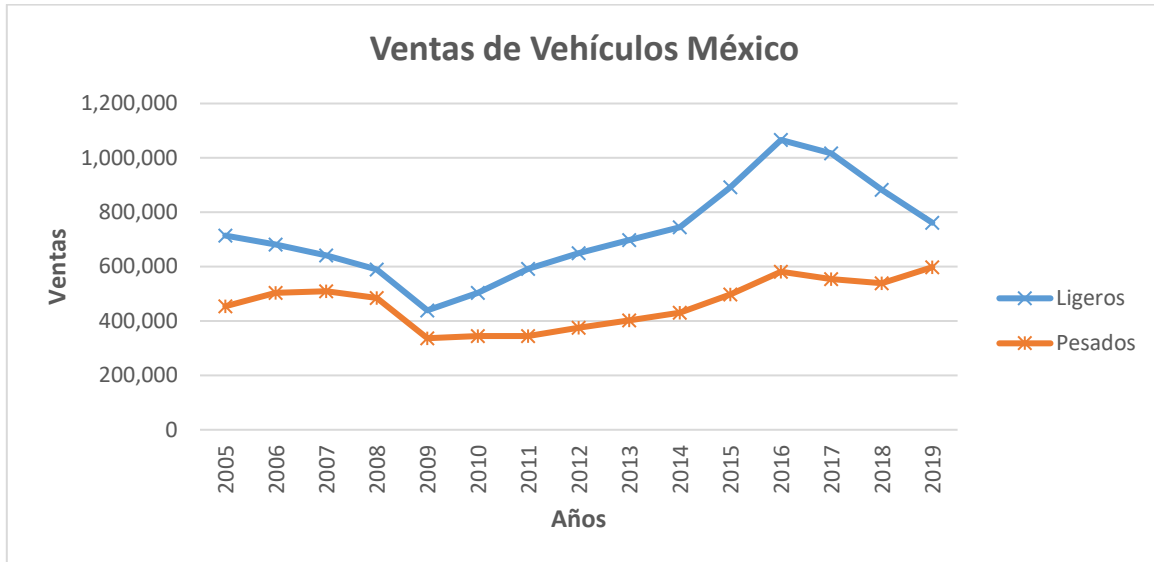
Figura 2 Ranking de los principales productos de autopartes a nivel global



Fuente: elaborado por AMIA con datos de OICA. * Incluye vehículos pesados.

En la producción mundial de autopartes China se mantiene a la vanguardia con 27.8 millones de unidades. Estados Unidos, se sitúa en el segundo lugar, con una manufactura de 11.4 millones. Con 9.7 millones encontramos en tercer lugar a Japón, y la India en cuarto puesto, con 5.2 millones. Alemania, quinto, con 5.1 millones. México, sexto con 4.1 millones. Corea del Sur, séptimo con 4 millones. En octavo sitio, Brasil con 2.9 millones. España alcanza la novena posición, con 2.8 y Francia logra el décimo sitio con 2.3 millones. Estos 10 países en conjunto producen 75.3 millones de vehículos, mientras que otras naciones tienen una sumatoria de 20.1 millones, para dar un gran total mundial de 95.4 millones de vehículos automotores manufacturados para el 2018.

Gráfica 2 Ventas de Vehículos en México



Fuente: Elaboración Propia con Datos de OICA 2019

En la gráfica 2, se muestra las ventas de vehículos en México tanto ligeros y pesados, claramente se puede ver que tienden a la alza a partir del año 2009. Pero a partir del 2016 la venta de vehículos ligeros empezó a decaer, en contraste la venta de vehículos pesados se mantiene.

1.1.1.4 Industria Automotriz de Nuevo León

A nivel nacional los mayores productores de la industria automotriz son los siguientes estados: Sonora, con 16.2% de la producción; Coahuila, con 15.9%; Puebla, con 13.6%; Estado de México, con 12.7%; Guanajuato, con 10.4%, y Nuevo León ocupa el séptimo lugar con una producción de 8.6%, según datos de la Asociación Mexicana de la Industria Automotriz (AMIA, 2018).

Nuevo León tiene costos de ingeniería, diseño y validación de pruebas con un costo 30% menor que en Europa. (SE, 2016)

En Nuevo León la inversión de la industria automotriz y es uno de los sectores con mayor crecimiento en los últimos años, genera más de 65,000 empleos directos y

tiene una participación de 26% en las exportaciones estatales (Cluster Automotriz de Nuevo León, 2016).

Para poder sostener la dinámica de la competitividad se requiere elevar la productividad en los procesos de fabricación, en particular al problema de la secuenciación de la producción

1.1.2 Causas y consecuencias del problema a estudiar

Para poder entender del problema de secuenciación de la producción de la industria automotriz, es necesario, primero definir que es secuenciación y el problema de la secuenciación.

Secuenciación es el orden en que se realizan las tareas en un proceso de fabricación (Conway,2003).

El problema de secuenciación, también puede denominarse problema de taller (Job Shop Problem), Problema de secuenciación (Secuencing problem), Problema de secuenciación de programación (Job Shop Scheduling).

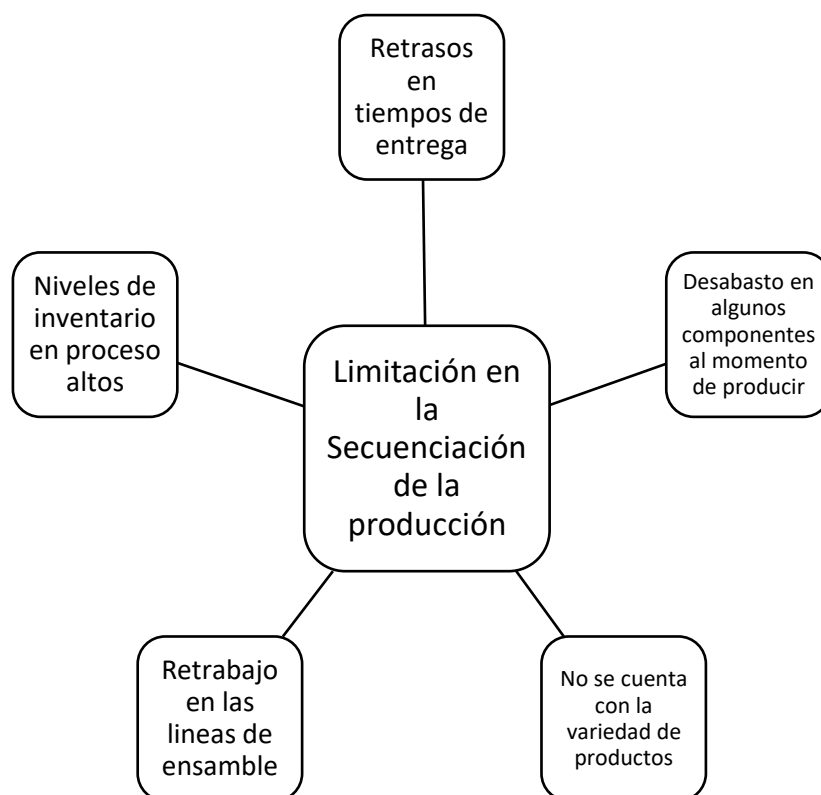
El problema de la secuenciación en cualquier sistema de manufactura, fue descrito por primera vez por Graham (1966). Donde menciona que es un problema de optimización de las ciencias computacionales y de la investigación de operaciones. Donde n trabajos J_1, J_2, \dots, J_n con diferentes tiempos de procesamiento, deben programarse en m máquinas con diferentes tiempos, minimizando el tiempo total de todos los trabajos al terminar de procesarse.

Este es un problema que no solo surge en las líneas de ensamble automotrices, también surge en las plantas manufactureras, programación de mantenimientos, clientes que tienen que acceder a un servicio, entre otros.

El problema de la secuenciación de la producción es uno de los temas que la industria automotriz a tratado de resolver a través de los años y con diferentes metodologías, como se mencionó anteriormente.

1.1.3 Mapa Mental del planteamiento del problema

Figura 3 Mapa Mental



Fuente: Elaboración Propia con Datos Thun et al (2007), Meissner (2010), Parello (1986)

Si este problema no se resuelve, afectaría de manera directa a los compradores de vehículos al no contar con la variedad de productos

A nivel operativo en las líneas de ensamble. Existirían los desabastos o sobre inventario de componentes. Afectando la producción comprometida con los clientes

Habría desabastos de algunos componentes generando retrabajos y en algunas ocasiones sobre inventario lo que implicaría costos, retrabajos y algunas ocasiones incumplimientos con los tiempos de entrega comprometidos con los respectivos clientes.

1.2 Planteamiento Teórico de Problema de Investigación

1.2.1 Teorías de fenómeno a estudiar (variable dependiente)

El problema de la secuenciación en cualquier sistema de producción, fue descrito por primera vez por Graham (1966) donde “n” trabajos J_1, J_2, \dots, J_n con diferentes tiempos de procesamiento, deben programarse en “m” máquinas con diferentes tiempos, minimizando el tiempo total de todas estaciones de ensamble. Siendo un problema de optimización de las ciencias computacionales y de la investigación de operaciones.

La secuenciación de la producción de la industria automotriz fue descrita por primera vez por Parello (1986) menciona que los automóviles producidos en las líneas de ensamble no cuentan con las mismas características, ni con el mismo orden de fabricación. Poniendo como ejemplo las variantes que existen de los modelos de automóviles básicos ofertados actualmente. A su vez las líneas de ensamble cuentan con estaciones diseñadas para ensamblar en línea sin sobrepasar su capacidad actual por este motivo los automóviles son acomodados en secuencia con el fin de cumplir esta restricción.

De acuerdo a (Mastrolilli & Gambardella, 1998), la definición que utilizan es: “la secuenciación de la producción es “n” trabajos son procesados en un conjunto de máquinas “m”. Cada trabajo tiene un orden operacional y tiene un tiempo de procesamiento. Cada operación está siempre disponible y se permite procesar una operación a la vez. El objetivo es definir la secuencia de las operaciones en cada máquina, minimizando su tiempo total de operación”.

Secuenciación, es el orden en el cual se realizan las tareas de un proceso de fabricación (Conway, 2003), puede considerar el tiempo de procesamiento, la llegada de una orden determinada entre otras (Chase,2007).

Una de las definiciones más aceptadas que describen la secuenciación de la producción es la de Company's. Citada en (Fernandez-Baños Marín, 2003): "Define "n" piezas (lotes, pedidos u órdenes de trabajo) deben realizarse en "m" máquinas (recursos, puestos de trabajo). Cada pieza a ensamblar implica la ejecución de cierto orden establecido en una serie de operaciones definidas donde cada operación tiene que estar asignada a una de las "m" máquinas las cuales tienen un tiempo de operación determinado; establecidas por un programa de producción que indiquen la secuencia de las operaciones en cada máquina.

Para este documento se utilizara la definición anteriormente mencionada, siendo una de las más mencionadas en los estudios de la secuenciación de la producción en la industria automotriz.

1.2.2 Relación teórica y aplicada de las variables independientes con la dependiente

Esta investigación tiene como propósito analizar cuáles son las variables que impactan en el proceso productivo del ensamble de camiones pesados, las cuales se enlistan a continuación: inventario en proceso, tamaño de lote, takt time, mezcla de productos, cuellos de botella, generación de desperdicios, tiempos de paro, capacidad instalada, tiempos de ciclo y tiempos de operación.

A continuación se explican de manera breve los estudios principales en los cuales se relacionan las variables independientes(X) con la dependiente (Y), los cuales son ampliamente presentados en el capítulo 2.

1. Para la variable tiempos de paro, los autores (Focacci, Laborie, & Nuijten, 2000), realizaron un estudio de cómo esta variable afectan a la secuenciación de la producción. El objetivo del estudio es disminuir el tiempo de paro en las líneas de producción, así como también el tiempo de inicio y fin de la

secuencia de los trabajos realizados en las estaciones de ensamble. Se utilizó el método programación de restricciones (CP), teniendo como objetivo minimizar los tiempos mencionados, tomando en cuenta las restricciones y disponibilidad de los recursos a utilizar.

En la tabla 3 se muestran los resultados del estudio que se llevó a cabo, donde por medio de la programación de restricciones se buscó optimizar el tiempo de paro de los modelos que tenían más problema al momento de secuenciar, se hicieron tres corridas hasta encontrar la óptima.

Tabla 3 Resultados

Tiempos de Paro (min)				
Modelo	1er Corrida	2da Corrida	3era Corrida	Optimización
T2-PS12	1710	1640	1640	1530
T2-PS13	1930	1640	1640	1430
TS-PSS12	1480	1300	1300	1220
TS-PSS13	1290	1220	1140	1220

Fuente: Elaboración Propia

2. Aguirre et. Al (2008), analizan como la variable tamaño de lote afecta la secuenciación de la producción en una empresa automotriz de Latinoamérica. El objetivo es mejorar la productividad de manera que las entregas puedan ser satisfechas en tiempo y forma. Se utilizó la simulación de eventos discretos para identificar las restricciones que tenía el sistema entre las cuales se detectaron el máximo tamaño de lote para cada familia, la mano de obra disponible, factores externos no visibles en el sistema real, así como también se identificaron los cuellos de botella los cuales fueron eliminados con una asignación nueva de los recursos actuales en cada una de la máquinas.
3. Barra et. Al (2007), tiene como objetivo de estudio determinar como el takt time influye en el proceso de producción. Realizaron una simulación por computadora por medio del software Promodel, para encontrar el takt time con el cual se pudiera producir un mayor número de unidades terminadas,

determinando que 58 segundos es el tiempo takt que debería tomar en la simulación para tener una producción de 522 unidades.

4. Ulgen et. Al (1989), estudiaron las variables cuellos de botella y capacidad instalada, para el área del pintura de un proceso de ensamble automotriz, donde por medio de la simulación modelaron diferentes secuencias
5. (Ulgen & Ali, 1989), realizaron un estudio de las variables cuello de botella y capacidad instalada. Donde se realizó un modelo de simulación por computadora del área de pintura de un proceso de ensamble automotriz. Donde el principal objetivo era determinar el tiempo de ciclo e identificar los posibles cuellos de botella. La tabla 4 muestra los resultados con y sin cambios en la secuenciación. También se probaron diferentes niveles de inventario para el modelo A en el AS/RS. En los resultados de la tabla indican que un tamaño de inventario de 180 vehículos será suficiente para evitar los trabajos faltantes del modelo A. También se determinaron los tamaños de inventario para la utilización de AS/RS. Con esto la planta tendría ahorro en costos para la reprogramación del modelo B.

Tabla 4 Resultados de la Simulación

Total de Trabajos Perdidos por Semana				
Modelo A Tamaño de Lote	Con resecuenciación		Sin resecuenciación	
	1 recubrimiento	2 recubrimientos	1 recubrimiento	2 recubrimientos
135	120.32	16.29	0	115.76
160	14.75	4.43	0	56.45
170	1.09	4.21	0	40.32
180	0	0	0	30.2
200	0	0	0	12.29

Fuente: Elaboración Propia

6. Para la variable inventario en proceso, los autores Duannmu, J., & Taaffe, K. (2007). Analizan cual es el número de contenedores de parabrisas necesarios para no detener el proceso de ensamble y secuencia de los modelos producidos. Se simulo por medio del software flexim en proceso de ensamble, se diseñaron aproximadamente 6 escenarios, encontrando que el número óptimo de contenedores el cual fueron 7.
7. Para la variable mezcla de productos. (Tiacchi & Saetta, 2007) Lo que se hizo primeramente para solucionar este problema fue definir lo siguiente:
 - Tareas principales, es el número de tareas que se llevan a cabo para completar cada producto.
 - Centros de trabajo, es el lugar donde cada operario, tiene que desarrollar una o más tareas.
 - Tiempos de ciclo, es el tiempo promedio que le toma al proceso en completar un modelo de automóvil.
 - Tiempo que toma en desarrollarse cada modelo, es el tiempo que le toma a cada estación procesar en cada estación su producto respectivo.

Teniendo estos datos, se simula en los paquetes de JavaSimulation el cual se utiliza para simular eventos discretos y SSJ mientras que es un set de herramientas que facilitan la programación en Java. Lo que se busca encontrar con la simulación es la mezcla optima en base a las unidades terminadas, reducir los tiempos de ciclo, los inventarios en proceso y el tiempo de traslado entre estación.

Con esta simulación se pudo obtener:

- Una regla heurística de secuenciación de producción
- El número óptimo de líneas de ensamble paralelos
- El impacto que tuvo el nivel máximo de llenado de los almacenes.

8. Trakultogchai et. Al (2013), estos autores estudiaron un proceso productivo de la industria automotriz de Tailandia, donde desean eliminar los cuellos de botella y mejorar los tiempos de ciclo. El método de solución utilizado fue la simulación por computadora donde se diseñaron tres modelos alternativos a partir del Modelo A (sistema actual). El Modelo B se agregaron las configuraciones que se utilizan para los colores; en el Modelo C se elimina la estación de limpieza para tener otro espacio de trabajo; en el Modelo D se consideró reducir el tiempo de procesamiento de la estación del primer recubrimiento, la tarea de inspección se dividió entre la estación de primer recubrimiento y secado. Se muestra en la tabla 5 los resultados de la simulación y donde se puede apreciar que la mejor estrategia en base al número de los modelos producidos es la D.

Tabla 5 Resultados de la Simulación

Modelo	Carros por día	Tiempo de Ciclo (Minutos)
A	35	20
B	45	15
C	47	15
D	50	10

Fuente: Elaboración Propia

9. Warwick, T., & Tsang, E. (1995). El objetivo del estudio fue minimizar el tiempo de operación de las máquinas, las cuales tienen una secuencia al momento de producir. Se construyó un modelo usando el software Arena. Se generó un número de réplicas (repeticiones de la simulación), para generar la solución óptima. Se calculó un Tiempo de operación con error relativo (MRE) que se calcula en base al mejor MRE y el óptimo tiempo de procesamiento LB.

1.3 Pregunta Central de Investigación

¿Cuáles son las variables de proceso que optimizan la secuenciación de la producción en las líneas de ensamble de camiones pesados?

1.4 Objetivo General de la Investigación

Determinar las variables que durante el proceso de ensamble de componentes en la industria automotriz de camiones pesados permiten optimiza la secuenciación en la producción e integrarlos a un Modelo de Optimización.

1.4.1 Objetivo Metodológicos de la Investigación

1. Mostrar la importancia de la industria automotriz a nivel mundial, en México y Nuevo León.
2. Analizar los antecedentes teóricos de la secuenciación de la producción y las metodologías con las cuales se han dado solución a la problemática.
3. Definir y fundamentar las variables teóricas, utilizadas en otros estudios previos publicados.
4. Diseñar el instrumento de medición y la operacionalización de las variables.
5. Analizar los resultados obtenidos del instrumento de medición.
6. Comparar los resultados obtenidos con los estudios previos revisados.
7. Generar conclusiones y recomendación sobre los datos obtenidos.

1.5 Hipótesis General de Investigación

Los variables del proceso de ensamble que optimizan la secuenciación de la producción de componentes en la industria automotriz de camiones pesados y que pueden integrarse en un modelo son:

1. Capacidad Instalada
2. Inventario en Proceso,
3. Tamaño de Lote,
4. Takt Time,
5. Mezcla de Productos,
6. Tiempo de Ciclo
7. Tiempos de Operación.

8. Cuellos de Botella,
9. Tiempos de Paro,
10. Generación de Desperdicios.

1.6 Metodología

El presente estudio será cuantitativo, donde el instrumento de medición será una simulación por computadora, simulando un proceso productivo de ensamble de una empresa automotriz de ensamble de camiones pesados de Nuevo León. El diseño de la investigación será experimental, ya que se va analizar si una o más variables independientes afectan a la variable dependiente, por medio de la manipulación intencional.

Una vez obtenido los resultados por medio del simulador se procederá a aplicar un modelo de regresión multivariable donde se analizara el impacto de las variables independientes sobre la dependiente, así como también se encontraran los valores óptimos de las variables de estudio.

1.7 Justificación y Aportaciones del Estudio

1. **Justificación práctica:** se verán beneficiadas todas aquellas empresas manufactureras que tengan procesos de ensamble en secuencia. Así como también la industria automotriz de camiones ligeros, ya que los procesos de ensamble son parecidos. Ayudará a las empresas a realizar de manera óptima la planeación de recursos tales como: materia prima, mano de obra. Logrando obtener un mejor margen de utilidad a la empresa.
2. **Justificación teórica:** al hacer una revisión previa de la literatura se encontró que la mayor parte de las investigaciones se enfocan en el problema de la secuenciación de producción en la industria de automóviles ligeros. En este estudio se aplicaran el conjunto de variables mencionadas anteriormente

para el caso del ensamble de camiones pesados. Además los estudios realizados, consideran solo algunas de las variables que se incluyen en la presente investigación.

3. **Justificación Metodológica:** se aplicaran las técnicas de simulación por computadora y las metodologías de los modelos predictivos, ya que se desea construir un modelo con las variables que mayor impactan en los indicadores productivos. Así como también se identificarán las variables y sus parámetros que impactan en la secuenciación.

1.8 Delimitaciones del Estudio

Para este estudio se requiere el proceso productivo de una sola empresa dedicada al ensamble de camiones pesados. Esta empresa es la más importante de México, ya que actualmente produce el 56% del mercado nacional con productos tales como camiones urbanos, suburbanos y foráneos y está ubicada en García Nuevo León.

CAPÍTULO 2.- MARCO TEÓRICO

Para iniciar con una perspectiva teórica del tema de estudio, se iniciara con la presentación de los modelos de decisión y productivos. Posteriormente se presentara la definición de secuenciación (Variable Dependiente) y sus métodos de optimización. Las definiciones teóricas y los estudios aplicados de las Variables Independientes: Capacidad Instalada, Inventario en Proceso, Tamaño de Lote, Takt Time, Mezcla de Productos, Tiempo de Ciclo, Tiempos de Operación, Cuellos de Botella, Tiempos de Paro y Generación de Desperdicios. Las Hipótesis que se desarrollaron en función de las variables independientes en conjunto con su modelo gráfico.

1) Modelos de Decisión

Los modelos de decisión suelen desempeñar diferentes papeles en los distintos niveles de la empresa. En los niveles más altos, los modelos por lo común aportan información en forma de resultados y conocimientos. Son útiles como instrumentos de planificación estratégica; ayudan a crear pronósticos, explorar alternativas, desarrollar planes para múltiples contingencias, acrecentar la flexibilidad y abreviar el tiempo de reacción. En los niveles inferiores, los modelos se usan con más frecuencia para obtener decisiones recomendables. La construcción de un modelo consiste en facilitar la recopilación de datos acerca de las operaciones. Después los administradores emplean esos datos para la actualización periódica de su modelo, más tarde, el modelo es revisado y vuelve a ser analizado para extraer de él nuevas recomendaciones que sustenten la toma de decisiones, dando lugar a la interpretación e implementación de nuevas decisiones por parte de la gerencia. (Eppen, Gould, Schmidt, Moore, & Watherford, 2000).

Las ventajas del uso de los modelos de decisión

- a. Especifican cuantitativamente las interacciones, con frecuencia los datos precisos son más accesibles y en el ambiente futuro implica menos incertidumbres.
- b. Ayudan a definir los objetivos.
- c. Identifican y registran los tipos de decisiones que influyen en dichos objetivos.
- d. Identifican y registran las interacciones entre todas esas decisiones y sus respectivas ventajas y desventajas.
- e. Obligan a pensar cuidadosamente las variables que se van a incluir y a definirlas en términos cuantificables.
- f. Obligan a considerar que datos son pertinentes para la cuantificación de las variables y a determinar la interacción entre ellas.
- g. Obligan a reconocer las restricciones (limitaciones) pertinentes en los valores que esas variables cuantificadas pueden adoptar.
- h. Los modelos permiten comunicar ideas y conocimientos, los cuales facilitan el trabajo en equipo.

2) Modelos Productivos

Desde la década de los 80's el futuro de los modelos de producción y de industrialización se han vuelto central, debido al nivel de análisis y de las variables que se consideran para cada teoría. (Freysenet & Boyer, 2003).

A pesar que en la literatura se ha escrito sobre los modelos de producción, no se tiene un consenso de cuáles son las características o variables que se tienen que considerar dentro de un modelo. Esto genera la falta de criterios al momento de generar un modelo de producción en una empresa, así como también se genera un problema de carácter metodológico, es decir si el modelo que se genera es o no el ideal (Berggren, 1994).

Un modelo de producción, es una combinación de un modelo de industrialización, ya que no solo se dedica a producción de artículos, sino que también abarca instituciones reguladoras macroeconómicas, estatales, locales o regionales. (De la Garza, 1994).

Las teorías más actuales e importantes de los modelos de producción son:

- a. Las postfordistas en sus tres modalidades: Neoshumpeterianismo, Regulacionismo y Especialización Flexible
- b. Toyotismo
- c. Lean Production
- d. Nuevos Conceptos de Producción
- e. Sistemomanufactura
- f. Nuevas Relaciones Industriales
- g. Industrial Governance

Algunas de estas teorías no se centran en el proceso productivo, aunque lo toman en cuenta, mientras que otras son exclusivamente productivas. En cuanto a las teorías del postfordismo, tienen en común la consideración que se llegó al fin de la producción estándar en masa, que se caracterizó en el periodo de la posguerra. Dentro de estas teorías postfordista destacan:

- a. Neoshupeterianos: Donde se plantea un desarrollo económico basado en la innovación, los procesos de aprendizaje y la adaptación tecnológica, así como en las instituciones relacionadas con investigación, desarrollo, educación y capacitación. La organización del trabajo aparece en esta Teoría en relación con la innovación tecnológica pero su desarrollo teórico importante es en la línea que va de la innovación e inversión. El concepto central, es el paradigma productivo, que se entiende como el conjunto que conocimientos en el que se basan las técnicas de los procesos productivos, circulatorios o de consumo central. (Dosi, 1988)

- b. Regulacionismo: es una teoría del desarrollo, analizando a través de los conceptos centrales de régimen de acumulación (articulación entre producción y consumo), el centro del análisis está en las instituciones de regulación entre producción y consumo; así, se define al Fordismo como el régimen de acumulación caracterizado por la articulación entre producción y consumo en masa (Boyer, 1989). A diferencia de las otras teorías convencionales esta se especializa en la importancia a las transformaciones en los procesos productivos, en particular a las formas de organización del trabajo y a las relaciones laborales. El Fordismo se caracteriza por ser un tipo de proceso productivo que añade los principios tayloristas de simplificación, estandarización y medición del trabajo, control de calidad.
- c. Especialización Flexible: parte del reconocimiento de la variabilidad del mercado y la exigencia para las empresas de realizar cambios frecuentes en presentación y productos que lleva a la producción en pequeños lotes (Piore, 1988).
- d. Toyotismo y Lean Production: se trata de teorías estrictamente centradas en el proceso productivo y su transformación organizativa sintetizada en la aplicación del Control Total de la Calidad y Justo a Tiempo. La teoría toyotista se trata sobre todo de un cambio en las relaciones sociales en los procesos de producción al generarse un trabajador participativo (Womack, 1990). La teoría del lean production (Tolliday, 1992) considera mínimos stocks, desperdicios, mano de obra y tiempos muertos.
- e. Los nuevos conceptos de producción (Kern y Schuman, 1997), mencionan si las tendencias productivas van hacia una integración sistémica, utilizando la computación y la información en los procesos de producción.
- f. Sistemomanufactura: se caracteriza por aplicar la informática en los procesos productivos (Kaplinsky, 1994).

- g. Nuevas relaciones industriales: esta teoría no se enfoca a los procesos productivos, pero se refiere a las relaciones laborales en el trabajo (Simonazzi,1999).
- h. Esta teoría se aleja de las preocupaciones de los modelos de producción y se vuelca hacia fuera de la empresa y sus relaciones entre firmas, el Estado y otras asociaciones (Ruiz Duran y Dussel,1999)

2.1 Marco Teórico de la variable dependiente (Secuenciación de la Producción)

El problema de la secuenciación en cualquier sistema de producción, fue descrito por primera vez por Graham (1966). Donde menciona que es un problema de optimización de las ciencias computacionales y de la investigación de operaciones. Donde n trabajos J_1, J_2, \dots, J_n con diferentes tiempos de procesamiento, deben programarse en m máquinas con diferentes tiempos, minimizando el tiempo total de todos los trabajos al terminar de procesarse.

La secuenciación de la producción de la industria automotriz fue descrita por primera vez por Parello (1986), donde menciona que los automóviles que se producen, no tienen las mismas características, ni tienen el mismo orden de fabricación. Un ejemplo serían las variantes de los modelos básicos que se ofertan actualmente. Las líneas de ensamble tienen diferentes estaciones de componentes, donde estas estaciones son diseñadas para ensamblar determinado porcentaje de automóviles, sin ser ensamblados por lotes, de lo contrario, no podría completar su producción, es por esto que los automóviles, deben ser acomodados en secuencia, sin que la capacidad de cada estación sea excedida.

De acuerdo a (Mastrolilli & Gambardella, 1998), la definición que utilizan es, la secuenciación de la producción es " n " trabajos son procesados en un conjunto de máquinas " m ". Cada trabajo tiene un orden operacional y tiene un tiempo de procesamiento. Cada operación está siempre disponible y se permite procesar una

operación a la vez. El objetivo es definir la secuencia de las operaciones en cada máquina, minimizando sus funciones objetivo.

Secuenciación, es el orden en el cual se realizan las tareas de un proceso de fabricación (Conway, 2003), puede considerar el tiempo de procesamiento, la llegada de una orden determinada entre otras (Chase, 2007). Otra definición es la de Company's Citado en (Fernandez-Baños Marín, 2003) que será la utilizada en esta investigación:

“n piezas (lotes de piezas, pedidos u órdenes de trabajo) deben realizarse en m máquinas (recursos, secciones, puestos de trabajo). La realización de cada pieza implica la ejecución, en cierto orden establecido, de una serie de operaciones prefijadas donde cada operación está asignada a una de las m máquinas y tiene una duración (tiempo de proceso) determinada y conocida; debe establecerse un programa, es decir, la secuencia de operaciones en cada máquina y el intervalo temporal de ejecución de las operaciones”.

Esta definición es más completa y sobre todo es utilizada en la mayoría de los estudios empíricos que hacen referencia a la industria automotriz y menciona los elementos que se van a estudiar como: estaciones de trabajos, variabilidad de modelos y secuencia programada de procesos.

2.1.2 Métodos de Optimización de la Secuenciación de la Producción

Existen en la literatura dos tipos de enfoques para eficientizar la secuenciación de la producción en la industria automotriz (Solnon & Dat Cung Van, The car sequencing problem: overview of state-of-the-art methods, 2005):

El primer enfoque es por los métodos de optimización (exactos), las cuales son:

- a. Programación de Restricciones
- b. Programación Entera

- c. Ad-Hoc
- d. Simulación

El segundo enfoque es por heurística (aproximado), con las siguientes metodologías:

- a) Enfoque en la Búsqueda Local
- b) Algoritmo Genético
- c) Optimización de la Colonia de Hormigas.

Cada uno de los métodos mencionados es abordado en los siguientes apartados de esta investigación.

2.1.2.1 Métodos sobre la optimización:

a) Método programación de restricciones

La programación de restricciones, es una herramienta genérica para resolver problemas en base a las restricciones que se tienen es decir varias variables que se tienen y estas toman un valor, los cuales son solucionados por algoritmos, llamados solucionadores de restricciones los cuales se basan en encontrar la solución más óptima. Para el problema de la secuenciación es una de las soluciones más usadas. (Tsang, 1993) (I.P. & T., 1999) .

La formulación de este problema por le generar introduce dos tipos diferentes de variables y tres tipos diferentes de restricciones:

- Una variable X_i está asociada a cada posición i en la secuencia de los coches y corresponde a cada clase de coche en la secuencia.
- Una variable O_i es asociada en cada posición i en la secuencias de cada opción j . Esta variable se le asigna 1 si la opción j tiene que ser instalada en la secuencia y 0 si no.

- Las restricciones de enlace especifican el enlace entre las variables y la opción, es decir, $O_{ji} = 1$ si y solo si la opción j tiene que ser instalada en X_i . Estas restricciones se establecen gracias al elemento global de las restricciones.
- Las restricciones de capacidad se deben especificar y no sobrepasar
- Las restricciones de demanda, también se deben especificar, para cada clase de automóvil y cada número de automóviles debe tener la secuenciación

La mayoría de los trabajos sobre la solución del problema de secuenciación son considerados como problemas de decisión, cada salida es una solución que satisface todas las restricciones de capacidad, en caso de no cumplirse significa que esa solución no es posible. Sin embargo (Bergen, Van Beek, & T., 2001) ha propuesto una restricción basada en un enfoque para un problema particular de la secuenciación de automóviles que contienen restricciones difíciles que deben ser satisfechas y las restricciones suaves están asociadas a un costo.

La programación de restricciones ha demostrado ser efectiva para resolver los pequeños problemas de secuenciación de automóviles, pero no es competitivo para los problemas complejos.

Para mejorar el proceso de solución de la programación de restricciones, (Smith, 1996), ha propuesto agregar un ordenamiento heurístico. La idea es programar aquellos automóviles “complejos” de ensamblar y que sean de los primeros.

Además (Regin & J.F., 1997) han introducido una restricción de secuencia global para imponer límites mínimos y máximos del número de unidades que deben ser procesadas consecutivamente, así como también propuso un algoritmo de filtrado, el cual es utilizado para las restricciones de la secuenciación y explota al máximo aquellas variables dominante.

(Hoeve, 2006), propuso tres algoritmos de filtrado, sin embargo al ser probado por (Lee, 1998), muestran que la combinación de estos algoritmos, mejoran

significativamente en algunas estaciones de trabajo, aunque en otras no se resuelven dentro de un tiempo razonable.

b) Método de programación entera

(Drexl & Kimms, Sequencing jit mixed-model assembly lines under station, 2001) , ha propuesto un modelo de programación entera para el problema de la secuenciación del automóvil. El modelo se basa en 0-1 variable C_{ij} asociadas a cada clase de automóvil i y cada posición j para decidir si el automóvil en la posición j es de la clase i . Las restricciones son lineales, ya que se debe asegurar:

- I) Se asigna exactamente una clase de automóvil a cada posición
- II) Todos los automóviles de cada clase son asignados a una posición
- III) Se cumple la restricción de capacidad p_k/q_k para cada opción k

El problema de secuenciación del automóvil se mezcla con un problema de programación de nivel el cual considera como objetivo es minimizar la suma de las desviaciones de los periodos programados de los vehículos ideales. Por lo tanto, el problema de secuenciación de automóviles con limitaciones de capacidad y un objetivo de programación. Propone un segundo modelo de programación entera basado en un modelo exponencial.

(Gravel, C., & W.L., 2005), ha propuesto un modelo de programación entera para la secuenciación de automóviles con problema de limitaciones sencillas. Este modelo asocia la variable C_{ij} y una variable 0-1 Y_{kj} para cada opción k y cada posición j para definir la longitud q_k que comienza en la posición j satisfaciendo la restricción de capacidad p_k/q_k . El objetivo es minimizar la suma de todos los Y_{kj} de las variables.

Esta formulación le permitió algunos autores como (Lee, 1998) a encontrar soluciones factibles al conjunto de pruebas proporcionado.

c) Método Ad – Hoc

(Drexl & Kimms, 2006), Propusieron un método llamado “branch and bound” para resolver el problema de la secuenciación, como un método basado en el esquema de ramificación original, donde cada secuencia de los automóviles está asociado a cada nodo de la rama y entrelazado. Además de la secuencia parcial correspondiente al nodo caracterizado por una matriz $(m_{ij})_{O \times \{1, \dots, |V| \}}$ donde $m_{ij} = 0$ si la opción i está presente en la posición j , $m_{ij} = 1$ si la opción i se puede planificar en la posición j y $m_{ij} = -1$ si no se puede planificar.

Para el cálculo de los resultados se recomienda un software especializado para esto.

(Brucker, Jurish, & Sievers, 1994), aplican el algoritmo de Braunch and Bound para resolver el problema de secuenciación, dando como resultado ser uno de los mejores algoritmos para resolver esta problemática utilizando como medida de desempeño el tiempo de terminación del último trabajo. Su característica principal es que emplea un esquema de ramificación que permite fijar arcos en la misma dirección u opuesta a la que tienen en el bloque critico de una solución factible.

(Hariri & Potts, 1991), también aplican este algoritmo al problema de secuenciación e intenta minimizar el máximo tiempo de terminación de tareas.

(Artingues & Feillet, 2007), aplican el algoritmo Branch and Bound al problema de secuenciación con secuencias dependientes del tiempo preparación. El objetivo fue minimizar el tiempo de terminación del último trabajo de forma óptima.

d) Simulación

En la industria automotriz sus sistemas productivos se caracterizan por fabricar a bajo volumen y con una variedad de productos diseñados y producidos como lo especifican los clientes dentro de tiempo y costo pactado. (Vajasuvimon & Supsomboon, 2014). En general estos sistemas de producción producen en

estaciones de trabajo que tienen una secuencia determinada a través de toda la planta.

Actualmente el método de simulación por computadora es muy utilizado, ya que en este método se pueden cambiar algunos parámetros o factores que se quieran estudiar sin afectar el sistema actual. Los procedimientos de simulación consisten en recopilar datos, la creación del modelo, la validación del modelo, el desarrollo del modelo y sus resultados de evaluación.

En el pasado, hubo varios estudios e investigaciones relacionadas con la secuenciación, donde utiliza el campo de las matemáticas con modelos numéricos. Actualmente la simulación, es una herramienta popular en varias investigaciones, que ayuda al investigador a estudiar y analizar los problemas.

A fines de la década de 1950 y 1960, la simulación era una herramienta muy costosa y especializada, que solo utilizaban las grandes empresas que podían invertir. Posteriormente, las computadoras se empezaron hacer más rápidas y baratas y fue más utilizada la herramienta de la simulación principalmente por empresas de la industria automotriz e industrias pesadas. Esta herramienta ayudo a los ingenieros y gerentes a tomar decisiones de forma rápida y confiable antes de la implementación.

Durante la década de 1990, los software de simulación tenían mejores funciones, animaciones, uso fácil y de fácil integración con otros software, por lo que se convertiría una herramienta estándar en muchas empresas.

En la industria automotriz, las herramientas de simulación fueron utilizadas para diseñar y operar las plantas aumentando su productividad, con esta herramienta fue capaz de identificar los cuellos de botella, problemas en el área de ensamble a través de la animación del proceso, inventario en proceso, capacidades y mejorar el rendimiento de la producción del sistema mediante los resultados del modelo y los resultados estadísticos (Ülgen & Upendram, 1995).

2.1.2.2 Métodos Heurísticos:

a) Enfoque en la búsqueda local

La idea de este método es mejorar la secuencia mediante la exploración local de su “vecindario”, es decir el conjunto de secuencias que se puede obtener de la secuencia actual realiza una transformación llamada “movimiento”. A partir de una secuencia inicial dada, el espacio de búsqueda se fundamenta en explorar al “vecino” hasta que se encuentre una secuencia óptima o hasta que un número máximo de movimientos se hayan realizado (Joly & Frein, 2008).

Construcción de la secuencia inicial. En la mayoría de los casos, la secuencia inicial, de la cual se inicial la búsqueda local, es un permutación aleatoria de un conjunto de vehículos a producir. Sin embargo, (Gottlieb, Puchta, & C., 2003), ha propuesto construir esta secuencia inicial con el método “greedy” demostrando que esto mejora significativamente el proceso de solución.

Vecindario, se pueden considerar diferentes tipos de movimientos, dando lugar a diferentes vecindarios. Muchos enfoques solo consideran los movimientos que intercambian pares de autos que requieren diferentes configuraciones de opciones.

Sin embargo, (Puchta & Gottlieb, 2002), introdujo otros cinco tipos de movimiento:

- Insertar adelante/atrás, que muevan el vehículo de una posición i y se inserte antes/después de la posición i .
- Intercambiar S, intercambiar dos automóviles cuyos requisitos de opción son diferentes para uno o dos opciones.
- Intercambiar T, que intercambia dos autos consecutivos
- Lin2opt, que invierte el orden los autos en una subsecuencia.
- Mezcla, que aleatoriamente mezcla una subsecuencia.

(Perron & Shaw, 2004), ha investigado sobre las capacidades de localización del vecindario más largo (LNS), para resolver la secuenciación de automóviles, se consideran dos tipos de vecindarios que ambos dependen de un parámetro de

tamaño s : el primero está definido por las permutaciones de autos, que se eligen de forma aleatoria e independiente; el segundo se define por todas las permutaciones de una subsecuencia de s autos consecutivos. También considera un tercer vecindario grande, eso se define al observar que variables se ven afectadas a través de la propagación de restricciones cuando una variable está congelada.

b) Algoritmo genético

Los algoritmos genéticos introducidos por (Holland, 1975), son algoritmos meta-heurísticos y están inspirados el proceso biológico de la selección natural. Los algoritmos genéticos imitan el proceso evolutivo, con el supuesto de que los individuos con ciertas características son aptos para sobrevivir y transmitir esas características a sus descendientes. Imitando este proceso se puede encontrar una solución que cada vez mejor que pueda satisfacer una función objetivo. Los algoritmos genéticos operan sobre poblaciones o conjunto de soluciones representadas en cadenas binarias, números enteros o decimales llamadas cromosomas. Durante su ejecución un algoritmo genético, cruza individuos de mejor aptitud para renovar la población y eliminar los de menor aptitud. Con este proceso iterativo se llega a una solución, que está representada por el cromosoma de mejor aptitud.

(Warwick & Tsang, 1995), proponen el algoritmo genético para resolver la secuenciación de automóviles. Este enfoque se inspira en la evolución natural y explora el espacio de búsqueda a través de operadores de selección, cruce y mutación sobre una población de secuencias. En cada generación, las secuencias seleccionadas se combinan mediante operaciones de cruce; como nos nacimientos creados los cuales pueden no satisfacer la restricción de permutación global, se reparan automáticamente y después de la reparación cada 7 descendencias es subida por una función de intercambio.

Los experimentos reportados con este enfoque muestran bajos porcentajes de utilización. Sin embargo aquellos que tienen alto porcentaje de utilización, el número de ejecuciones exitosas se reduce drásticamente.

(Cheng, Lu, & Puskorius, 1999), propone un algoritmo en el cálculo evolutivo para resolver un problema práctico de secuenciación de vehículos en Ford Motor. Donde los autores proponen un operador de cruce simple, llamado operador de conmutación cruzada, generando una descendencia intercambiando vehículos que aparecen en una posición elegida al azar en las secuencias padres.

(Sun, Cheng, & Liang, 2010), Resuelven el problema de secuenciación para el que proponen un algoritmo genético con función de penalización. Los autores proponen dos operaciones al algoritmo genético clásico, una operación llamada “Clonal Selection” y otra “LifeSpan Extended Strategy”. El objetivo de estas dos operaciones es la evitar la convergencia prematura que ocasiona una solución pseudo-óptima. Y evitar generar alta diversidad en la población inicial para evitar este problema.

c) Optimización de colonia de hormiga

(Solnon C. , 2000) Fue el primero en proponer un algoritmo dedicado a la satisfacción de restricciones de permutaciones, la idea básica de modelar el problema para resolver como la búsqueda de una trayectoria de costo mínimo en un gráfico y el uso de hormigas artificiales para buscar buenos caminos. El comportamiento de las hormigas artificiales se inspiran en las hormigas reales: poner feromona en los trazos de los componentes del gráfico y eligen sus caminos con respecto a las posibilidades de los senderos de feromonas que hayan sido colocados previamente por la colonia; estos senderos de feromonas disminuyen progresivamente por evaporación. Intuitivamente, esta comunicación pretende dar información sobre la calidad de los componentes del camino para atraer hormigas, en las siguientes iteraciones hacia las áreas correspondientes del espacio de búsqueda. En el algoritmo, la feromona se establece en parejas de coches consecutivos en un orden para aprender las subsecuencias de los automóviles.

(Omkumar & Shahabudden, 2006), aplican el algoritmo de colonia de hormigas problema de secuenciación, donde mencionan que por medio del algoritmo se hizo una simulación para encontrar la mejor solución al problema de ensamble en las

estaciones de trabajo, a nivel multitrabajo, utilizando a su vez reglas de despacho, se logró reducir el tiempo total del proceso en un 17.55%

Algunos de estos métodos se pueden utilizar para el problema de la secuenciación de la producción, pero es necesario comprobar que la solución es la adecuada, para esto se puede utilizar la simulación de procesos, para corroborar si efectivamente las variables con sus restricciones, son las óptimas. (Merwe, 2010)

En esta tesis se utilizara la técnica de simulación debido a que hoy en día es una de las herramientas más utilizadas del análisis cuantitativo (Eppen, Gould, Schmidt, Moore, & Watherford, 2000). Teniendo las siguientes ventajas:

1. Los modelos analíticos por lo general predicen solamente el comportamiento promedio “de estado estable” (a largo plazo). En modelos de la vida real, sin embargo, a menudo es importante comprender la variabilidad posible en las medidas de desempeño, o en la manera en que varían a corto plazo.
2. La simulación puede llevarse a cabo utilizando un amplia variedad de programas, desde las hojas de cálculo (Excel, Lotus), complementos de hoja de cálculo (Crystal Ball, @Risk), lenguajes generales de programación para computadoras (PASCAL, C++), hasta los lenguajes diseñados para simulación (SIMAN).
3. La capacidad de los modelos de simulación para trata con complejidad, manejar la variabilidad de las medidas de desempeño y reproducir el comportamiento a corto plazo permite que la simulación sea una herramienta poderos.
4. Los modelos de simulación se utilizan a menudo para analizar una decisión bajo riesgo; esto es, un modelo en el cual el comportamiento de una o más variables que no se conoce con certeza.

En un estudio realizado (Valero, Garcia, Coronado, & Hernandez, 2011). Se menciona que la mayor parte de los autores consideran el problema de secuenciación desde el punto de vista estático, esto es, que todos los productos no secuenciados están disponibles para ser introducidos en la secuencia en cualquier momento. Sin embargo, el problema real no exige que todos los productos estén disponibles al principio del proceso, ni siquiera que sean estrictamente conocidos.

2.2. Marco Teórico y estudios aplicados de las variables independientes

2.2.1 Capacidad Instalada

La capacidad se expresa en cualquiera de estas dos formas: como mediciones de salida de producto (opción usual para procesos de flujo de línea) o como mediciones de insumos (opción habitual para procesos de flujo flexible). Para poder planificar la capacidad se requiere tener un conocimiento de la capacidad actual y su utilización, o sea, el grado en que el equipo, espacio o mano de obra se emplean actualmente. (Carro Paz & González Gómez, 2004)

La capacidad instalada se refiere a la disponibilidad de infraestructura necesaria para producir determinados bienes o servicios. Su magnitud es una función directa de la cantidad de producción que puede suministrarse. (Mejía, 2013)

La capacidad instalada es el potencial de producción o volumen máximo de producción que una empresa en particular, unidad, departamento o sección; puede lograr durante un período de tiempo determinado, teniendo en cuenta todos los recursos que tienen disponibles, sea los equipos de producción, instalaciones, recursos humanos, tecnología, experiencia/conocimientos, etc. (Jara, 2015).

La definición que se utilizara la de (Jara, 2015), será utilizada en este estudio, ya que se necesita conocer primeramente la capacidad actual y utilización de las

estaciones de trabajo, para saber si es esta en la capacidad máxima o simplemente optimizar los recursos que se cuentan actualmente.

Estudio 1

Este estudio de simulación se realizó durante la fase de diseño de una nueva banda transportadora. (Ulgen & Ali, 1989).

Una planta de ensamble realiza diferentes modelos de carros, el estudio se centró en las líneas de los asientos del automóvil.

Los procesos y la secuencia de trabajo mostraron diferencias dependiendo del modelo del automóvil. El diseño conceptual del nuevo sistema se guio en base al anterior sistema. Sin embargo, para acomodar la secuencia del ensamble, fue necesario crear nuevas locaciones donde el proceso lo requiriera, esto con el fin de asegurar de que las cantidades deseadas del producto se pudiera mover a lo largo de la línea de producción.

Un parámetro importante en el diseño fue la combinación de los modelos en la tasa de producción objetivo.

Los objetivos de estudio fueron:

- Verificar la capacidad de la banda transportadora para mover el número objetivo de vehículos a través del sistema de corte considerando la variedad de producto
- Investigar en varios escenarios el tamaño de lote a producir.
- Analizar el impacto de construir un área de inventario adicional.
- Determinar los tiempos de ciclo máximo permitidos en varias estaciones.

Se consideró lo siguiente en la simulación:

- Todas las operaciones manuales se pueden completar dentro del tiempo de ciclo dado.

- Todos los materiales están siempre presentes.
- La velocidad de línea se configuro con la más alta velocidad requerida
- Hay tres modelos de autos y ocho combinaciones posibles de esos modelos.

El sistema consistía en un sistema de acumulación de chasis, un sistema de entrega de motor, un sistema de acumulación de trama y una línea de corte final.

Todos los movimientos de material se realizaron mediante el uso de potencia y bandas libres, excepto para la acumulación de marco área donde se usó una banda de cadena para mover las unidades continuamente. La transferencia de unidades entre las áreas principales se requiere equipo complicado que es propenso a fallas mecánicas. Como había espacio limitado para áreas de inventario, se diseñó un espacio de almacenamiento adicional en el entresuelo. El tamaño del inventario estaba siendo cuestionado ya que hubo tiempos de inactividad aleatorios en los principales puntos de transferencia. El sistema fue diseñado para funcionar a una velocidad 12% más alta que la velocidad requerida, para dar tiempo a las averías y cambios de turno. Sin embargo, los diseñadores querían confirmar que el sistema sería capaz de entregar un número promedio de vehículos para alcanzar el objetivo de producción semanal a una tasa de tiempo de inactividad del 5 al 10%. En base a datos pasados, solo se especificó un tiempo de recuperación promedio de 5 minutos. Además, el área de ensamblaje del motor recientemente diseñada requirió la cantidad adecuada de tarimas en el sistema para soportar la producción de todos los tipos de trabajos. Ya que podría haber una variedad de mezclas de trabajos para producir en el sistema, era necesario determinar una cantidad de tarimas que funcionarían con todas las combinaciones de productos posibles.

Durante el estudio de simulación, primero se realizó una evaluación de posibles mezclas de productos utilizando una línea de base. Esta parte del estudio ayudó a determinar los tiempos máximos de ciclo permitidos en las estaciones críticas para acomodar una variedad de mezclas de productos. Luego, el estudio se centró en la evaluación del tamaño del inventario.

Se investigaron tres alternativas de diseño diferentes. Las ejecuciones de simulación indicaron que no habría diferencia entre diseños con respecto a la capacidad de rendimiento promedio. Sin embargo, la utilización de varios los subsistemas se verían muy afectados por la asignación de los inventarios.

La tabla 6 muestra, para los tres diseños alternativas, el tiempo que lleva deshabilitar a varios subsistemas después de una falla en uno de los puntos críticos de las estaciones. La tabla 6 demuestra claramente que la segunda alternativa de disposición es significativamente mejor que las otras dos.

Tabla 6 Resultados de la Simulación

Tiempo en el cual los subsistemas estan deshabilitados despues de un tiempo de paro (minutos)			
Subsistema	Layout 1	Layout 2	Layout 3
Chasis 1 y 2	20	7	7.5
Chasis 3	12	4.5	5
Chasis 4	4.5	2	2.5
Motor	37	37	37
Línea final	2	2	2
Tiempo Total	75.5	52.5	54

Fuente: Elaboración Propia

El modelo de simulación mostró que en el punto de transferencia desde la construcción del motor línea al área de la plataforma del motor, la lógica de control y el tamaño del inventario originalmente propuestos no soportarían el requisito de tiempo de ciclo del área de ensamblaje del motor. Además, la simulación mostró que la línea de montaje final sería un área muerta inmediatamente si el tiempo de inactividad en el área de ensamblaje del cuerpo fuera más de 3 minutos. También se determinó que el espacio de almacenamiento intermedio ubicado en el nivel del entrepiso sería suficiente solo para los tiempos de paro.

Estudio 2

Otro caso de otra simulación diseñada para la industria automotriz (Ülgen & Upendram, 1995).

Este estudio de simulación se realizó durante la fase de diseño conceptual de un nuevo programa de vehículo para un importante fabricante de automóviles de EE. UU. El sistema estudiado consistió en los siguientes componentes: (1) una línea de ensamble del automóvil sistema con varias estaciones, (2) tablas de giro de 90 ° entre varias secciones del sistema de seguimiento de automóviles, (3) varias estaciones robotizadas de soldadura por puntos, (4) dos estaciones de carga / descarga para dos modelos diferentes de automóviles, y (5) un determinado número de transportistas para cada modelo de automóvil.

Los objetivos del estudio fueron:

1. Determine la mejor configuración de equipo y el rendimiento de línea correspondiente bajo un conjunto dado de Parámetros de operación.
2. Determine el tiempo de ciclo máximo permitido en las estaciones de carga para cualquier modelo de automóvil.
3. Determine la mejor cantidad de transportistas para cada modelo de automóvil.

Las consideraciones que se tomaron para el modelo fueron las siguientes:

La tasa de producción objetivo es de 38 autos modelo A y 18 modelos B.

- Siempre habrá un vehículo esperando cargar en cualquiera de las estaciones de carga.

- Cada estación tiene un tiempo de inactividad distribuido aleatoriamente y un tiempo de reparación aleatorio. Estos datos se obtuvieron de las bases históricas de la empresa.
- El tiempo de transferencia entre dos estaciones en la línea es de 6 segundos si los transportistas no lo hacen detienen la estación. Si el vehículo se detiene en una estación, el tiempo de transferencia sería de 8 segundos, teniendo en cuenta la aceleración y la desaceleración.
- Se supone que una estación se descompone solo después de un ciclo completo de operación, no durante el ciclo.

Los siguientes parámetros y variables (evaluados en los escenarios hipotéticos) se usaron en el modelo de simulación:

- (1) Dos configuraciones diferentes en las máquinas principales y los datos de tiempo de inactividad.
- (2) El número de operadores asignados a cada uno de los dos tipos de trabajo
- (3) Ciclos de estación de carga / descarga.

En las estadísticas del modelo se incluyen las utilidades de cada estación y el rendimiento de la línea de producción para cada tipo de automóvil.

El sistema se modeló utilizando el software AutoMod de manera que la mayoría de los parámetros se pueden ingresar desde los archivos de datos en lugar de modificar el modelo. La capacidad se evaluó en tiempos de inactividad del equipo con diferentes equipos configuraciones, que van desde intensivos en mano de obra hasta procesos robóticos. En particular, el tipo de equipo para la estación de alineación robótica (RA) se consideró en detalle. Tabla 7 resume los resultados de algunos de los escenarios investigados durante el estudio.

Tabla 7 Resultados de la simulación

Parámetros	Escenarios			
	1	2	3	4
Estacion Tipo RA	I	II	I	II
Tipo de estación de soldadura principal	Manual	Robot	Robot	Robot
La estación cuenta con configuración flexible	No	No	Sí	Sí
Resultados				
No. De Modelo A completado/hora	32.47	33.29	33.44	33.57
No. De Modelo B completado/hora	15.64	16.33	16.48	16.59
Promedio de producción / hora	48.11	49.62	49.92	50.16

Fuente: Elaboración Propia

Los resultados en la tabla 7 indican que la última alternativa, con una configuración de línea flexible y una estación RA de tipo II, proporcionaría la mayor cantidad de salida de la línea. Otros escenarios que no se muestran en la tabla también mostraron que el rendimiento del sistema no era muy sensible a la cantidad de operadores. Además de esos resultados, también se encontró que la operación de carga se podría hacer manualmente para los autos modelo A sin afectar el rendimiento, aunque se necesitó un tiempo de ciclo más largo. En consecuencia, una configuración de línea con la mejor combinación de operaciones robóticas y manuales se determinó y se presentó al equipo de proyecto.

Estudio 3

El objetivo del estudio es utilizar la técnica de simulación para evaluar el impacto de los cambios de las utilidades de los recursos, inventario y cuellos de botella. (Gadinaik & Bilolikar, 2014)

El estudio se centra en la estación de trabajo involucrada en la producción o flujo de productos seleccionados y se supone que hay un flujo de parte discreto. El estudio

ignora la otra evaluación parámetros tales como gestión de inventario y problemas de retraso.

La naturaleza del estudio requería una empresa de taller de trabajo con múltiples categorías de productos con volumen moderado de producción.

Según los datos recopilados, se crea un modelo con el software ARENA. El modelo está hecho mediante el uso de funciones incorporadas del software. Hay veintiocho estaciones de trabajo haciendo doce diferentes tipos de operaciones.

Algunas máquinas tienen un cien por ciento de utilización indicando que esas máquinas son cuellos de botella en el proceso y algunas máquinas están sobre utilizadas

Cambiamos los parámetros de la utilización de las máquinas y la eliminación de cuellos de botella.

El resultado del análisis de enrutamiento ayudó a descargar la carga de máquinas con cuello de botella en las máquinas sobre utilizadas. Esta información se alimenta al modelo ARENA y se desarrolla un nuevo modelo.

Se muestra en la figura 4 la utilización revisada de los recursos ha aumentado, mientras que algunos de los las máquinas se eliminan para usos alternativos.

Figura 4 Resultados de la simulación

Process	Old Utilization	New Utilization	Result Improvement
j3p2	12.22	83.61	71.39
j3p3	70.56	81.39	10.83
j3p4	58.06	25	33.06
j3p5	48.75	24.72	24.03
j3p6	35.97	Eliminated	
j3p7	33.33	Eliminated	
j5p1	45.83	87.71	41.88
j5p3	57.5	92.78	35.28
j5p4	94.58	5.27	89.31
j5p5	66.25	5.27	60.98
j5p6	17.15	Eliminated	
j5p7	17.15	Eliminated	
j7p3	13.82	97.92	84.1
j7p4	97.92	52.5	45.42
j7p5	52.5	Eliminated	
j8p4	12.5	38.75	26.25
j8p5	25	Eliminated	

Fuente: Gadinaik & Bilolika (2014)

Con base en este documento fue capaz de establecer una mejora en la utilización de las máquinas y también de eliminar algunas máquinas, liberar recursos para su uso alterno.

2.2.2 Inventario en Proceso

Definición

El inventario en proceso, puede ser entendido como una cantidad de producto físico que puede ser atendido en actividades sucesivas de un proyecto repetitivo, permitiendo perfilar el trabajo de ciertas actividades, ajustándose a las variaciones en las tasas de producción, en una cadena de producción (González Vicente, 2003).

El inventario en proceso, son subproductos específicos que se colocan en contenedores, en lugares cercanos de un proceso de fabricación, los cuales al momento de ser utilizados se vuelven a rellenar (Pedro & Echávarri Yepes, 2009)

Todo artículo o elementos que se utilizan en un proceso de producción se los define como Inventario en proceso que tienen como característica que va aumentando su valor con cada proceso de transformación hasta convertirse en producto terminado.

Es decir son productos parcialmente terminados que se encuentran en un grado intermedio de producción que fueron aplicados labor directa y gastos indirectos inherentes al proceso producción en un momento determinado. (Krajewski, L., & M., 2011).

El inventario en proceso, son productos almacenados de los procesos productivos, a menudo utilizados para asegurar la continuidad de la producción. Por lo regular son componentes, repuestos, herramientas, etc. (SELECTED, 2016).

Para este estudio se utilizara la definición de (Krajewski, L., & M., 2011), en los estudios empíricos revisando se menciona esta variable como una de las principales ya que se tiene a lo largo de las líneas de ensamble inventarios en proceso que van agilizando las estaciones de trabajo con el fin de no generar cuellos de botella y aumentando los productos terminados.

Estudio 1

Duannmu, J., & Taaffe, K. (2007). Un fabricante de automóviles tiene una fábrica de automóviles moderna e independiente. Tienen tres plantas donde se encuentra: el taller de carrocería, taller de pintura y el departamento de montaje, en el segundo hay una fundición. En la tercera planta se produce la producción de componentes de soldadura y el montaje de las cabinas, también se encuentra la rama de gabinetes especiales.

El ejemplo discutido se refiere al suministro secuencial de parabrisas de dos tipos automóviles fabricados por este fabricante. Los parabrisas se utilizan al 100%, lo que significa que son utilizados en todos los modelos y tipos de automóviles que se manejan.

Se suministran en secuencia en contenedores especiales, que ayudan a organizar Los parabrisas en el orden en que más se utilizan en la línea de montaje. La capacidad de dicho contenedor tiene 12 elementos como máximo (independientemente del modelo del automóvil).

El ciclo de los contenedores, comienza desde el contenedor vacío en un almacén de Operador Logístico. Cada 20 minutos (si solo se ha tomado un contenedor) o cada 40 minutos (si se han tomado dos contenedores), se toman en lugar de acuerdo a la secuencia. Los contenedores plegados se transportan al almacenador intermediario de envases llenos en el almacén del operador logístico, que se encuentra cerca de los contenedores vacíos. Los trabajadores transportan siempre solo un contenedor lleno inventario intermedia (debido a su peso). Los contenedores preparados esperan el transporte del fabricante del automóvil (1ª planta). Los contenedores se van surtiendo de acuerdo al plan de producción programado (aproximadamente cada 40 minutos). En el camino de regreso toman contenedores vacíos. Para el transporte de contenedores de dicho tipo, se utilizan tres camiones de Operador Logístico y también llevan otros contenedores de partes.

La distancia entre las plantas es de aproximadamente 6 kilómetros. Los contenedores llenos van al inventario en proceso apropiado en el fabricante de automóviles, del cual, en el tiempo esperado, se entregan a la línea de montaje por empleado del operador de logística. Siempre debe haber dos contenedores en la línea de ensamblaje, uno vacío y el otro pendiente. En su mayoría, sin embargo, hay tres contenedores. El tiempo de contacto de la línea de montaje aumenta el tiempo de consumo de los objetos a unos 22.2 minutos (tiempo de tacto multiplicado por una serie de parabrisas en un contenedor).

El contenedor vacío se saca del inventario de los contenedores vacíos a la carga plataforma y se espera que regrese al Operador Logístico, donde el ciclo comienza de nuevo.

Al comienzo de los estudios, el fabricante del automóvil utilizó el archivo MS Excel para encontrar la cantidad necesaria de contenedores. En este archivo, el usuario decide si una pieza en particular es para automóviles tipo A y B o solo tipo A o B. A

continuación, rellena una columna apropiada con todos los campos necesarios, como tiempo de tacto, transporte tiempo, tiempo de secuenciación, cantidad de elementos en el contenedor, etc. Después de completar todos los campos, la hoja calculo (según las reglas de la compañía) y muestra el resultado en un campo apropiado. Esta es una forma estática de resolver el problema y tiene muchos inconvenientes. No proporciona la cantidad exacta de contenedores necesarios en el proceso. Por lo tanto, hay demasiados contenedores e inventario en proceso.

Una solución sugerida para el problema de la cantidad de contenedores es la simulación. El modelo debe responder a la pregunta: ¿cuántos contenedores en el proceso es necesario para mantener la línea de ensamblaje funcionando? Por otra parte, el modelo de simulación debe permitir visualizar los parámetros importantes del proceso. Por ejemplo, verificar cómo el aumento de la cantidad de contenedores o los cambios en el horario de salida de los camiones influirá en el conjunto proceso.

El software Flexsim Simulation ha sido elegido para resolver este problema. Flexsim es una simulación de nueva generación aplicación de software donde los modelos se construyen directamente en 3D. Es un objeto moderno orientado a objetos, analítico complejo herramienta. La decisión de elegir esta herramienta en particular se ha basado, entre otras cosas, en su facilidad de uso características, arquitectura abierta, concepto sencillo de modelado y escalabilidad completa. También posibilidades de presentación, animación e introducción de cambios directamente en 3D han sido de crucial importancia (Beaverstock, Greenwood, Lavery y Nordgren 2011).

El modelo de simulación se divide en tres partes. El primero muestra el flujo de contenedores en almacén de operador logístico, el segundo representa una ruta entre el operador de logística y el fabricante del automóvil, y la última muestra el flujo de contenedores dentro del automóvil.

En la ventana principal de la simulación se han colocado todos los elementos y parámetros clave.

El seguimiento de cada uno de los contenedores es posible en tiempo real. El color del contenedor también proporciona información si está lleno o vacío. Cada una de las piezas presentadas en el proceso ha sido claramente marcada para facilitar la observación de los lugares de acumulación potencial de los contenedores. En la parte inferior de la principal ventana se colocan información sobre: la salida del camión más cercano; hora de salida, teniendo en cuenta el retraso especificado en los parámetros; el número de casillas en lugar de la secuencia (Operador Logístico) y la cantidad de contenedores en una línea de ensamblaje; el número máximo de contenedores en una línea de montaje y la próxima partida del camión (al fabricante del automóvil).

En la parte central de la ventana una información sobre la fecha y hora actual de la simulación y los contenedores se muestra un número que indica la cantidad de piezas que se encuentran actualmente en el contenedor usado en los campos de ensamblaje y terminación.

La introducción de contenedores en el modelo sigue directamente desde el "inventario virtual". Este es un inventario ficticio, cuya capacidad es igual al número máximo de contenedores en circulación imputados con un parámetro apropiado. Los contenedores disponibles en la "sala de espera" son introducidos gradualmente en el modelo para garantizar la continuidad del suministro. Durante el funcionamiento del modelo, la introducción de contenedores se puede llevar a cabo de una de tres maneras: a través de la estación de ensamblaje; por secuencia o de una manera híbrida. La introducción de contenedores a través del proceso de montaje le da una mayor prioridad que el proceso de secuenciación, es una situación normal. Al iniciar el modelo, la línea de producción también se está ejecutando. La línea carga ("tira") del inventario virtual que el contenedor requiere para realizar una instalación. En este momento, la secuencia no se lleva a cabo. La

posición de montaje gradualmente obtiene más contenedores virtuales del inventario. Durante este tiempo, los primeros contenedores vacíos van al lugar de secuenciación, donde están llenos. Después de un tiempo el modelo está equilibrado, la línea de montaje ya no se pone nuevos contenedores virtuales desde el inventario porque está completamente provisto de la secuencia. Este es el óptimo modelo de puesta en marcha. Si se utiliza el conjunto disponible de contenedores virtuales en el inventario, pero la línea de la derecha el tiempo no incluye un contenedor lleno, aparecerá una advertencia sobre contenedores faltantes en la línea de ensamblaje mostrado. La introducción de contenedores a través del proceso de secuenciación le da una prioridad más alta que en el proceso de montaje. En el momento de la puesta en marcha del modelo, se lleva un contenedor al lugar de la secuencia desde el inventario virtual. En ese momento, la línea de ensamblaje no se usa. El ensamblaje comienza cuando se llena por primera vez. Después de un tiempo, el modelo está equilibrado, el proceso de secuenciación ya no toma nuevos contenedores del inventario virtual. Este modo no es posible si la opción responsable de detener el la simulación está habilitada, la introducción de contenedores de forma híbrida depende de la carga simultánea de contenedores desde un inventario virtual para el proceso de secuencia y ensamblaje.

Este método permite las más rápida puesta en marcha del modelo. El circuito de camiones es independiente del número de contenedores preparados. El transporte Siempre comienza según lo previsto, incluso si no hay contenedores preparados. Los camiones que transportan los contenedores son marcados simbólicamente en el modelo. Las secciones que se muestran en el medio de la ventana representan la ruta entre el fabricante del automóvil y el operador de logística. Gracias a los camiones podemos hacer un seguimiento de la real posición del transporte. La lectura del archivo de control MS Excel ocurre solo durante el arranque del modelo. Todos los datos requeridos para el funcionamiento son cargados por el programa y guardados bajo el concepto de variables. La información sobre los siguientes envíos se exporta durante la simulación a un MS externo Hoja de cálculo de Excel. Para cada uno de ellos, está la información sobre los horarios

de salida desde diferentes posiciones y la cantidad de contenedores que se toman cada vez.

El modelo de simulación creado permite realizar la simulación del proceso de entrega de secuencia. Todos los tiempos y parámetros se han establecido en un valor estándar.

El siguiente paso ha sido realizar simulaciones durante 30 días de trabajo. El objetivo de simulación realizada ha sido definir el número mínimo de contenedores en el ciclo (que son necesarios para mantener la continuidad del trabajo de la línea de ensamblaje).

Para los parámetros estándar, 11 contenedores son suficientes para mantener la línea de ensamblaje funcionando. Significa que el fabricante de automóviles tiene casi el doble de contenedores que los que necesitan. La reducción de la cantidad de contenedores puede resultar en ahorros considerables.

El siguiente paso fue realizar otras simulaciones con diferentes parámetros. Ha sido la cantidad de ventanas en un contenedor y el tiempo de secuenciación que se han cambiado en simulaciones adicionales.

Todas las simulaciones se realizaron durante 30 días hábiles. Además, todos los estados iniciales de los inventarios han sido poner a cero (hoja PARÁMETROS), tabla "estado inicial de los inventarios".

Los resultados de todas las simulaciones realizadas se muestran en la tabla a continuación (Figura 5).

Figura 5 Resultados de la simulación

Ejemplo (número)		St.	1	2	3	4	5	6
Tiempo de secuencia un contenedor	Min.	15	19	23	30	12	8	15
	re	17	20	26	34	13	9	17
	Max	20	25	30	40	15	10	20
Cantidad de unidades en contenedor	12	15	18	24	9	6	12	
Cantidad de cambio porcentual de unidades en contenedor	0%	25%	50%	100%	-25%	-50%	0%	
Cantidad de cambio porcentual de contenedores	0%	-18%	-27%	-36%	18%	55%		
Horario de camiones (cada ... min)	40	40	40	40	40	40	30	
Cantidad de contenedores	11	9	8	7	13	17	10	

Fuente: Duannmu, J., & Taaffe, K. (2007)

Las primeras tres líneas contienen el tiempo de secuenciar un contenedor, mínimo, máximo y dominante. La cuarta línea contiene las cantidades que debe tener el contador. Las siguientes dos líneas incluyen el porcentaje de una unidad en proporción al valor estándar. La siguiente línea contiene las salidas de los camiones.

La última línea “cantidad de contenedores” contiene la cantidad mínima de contenedores necesarios para mantener la línea de ensamble trabajando.

Siendo los mejores escenarios para este modelo el 1, 2,3 y 6.

2.2.3 Tamaños de Lotes

Definición

Se entiende como aquel tamaño de materia prima que minimiza los costos generados en la gestión de inventarios. (Carro Paz & González Gómez, 2004)

Es la cantidad de materia prima, que entra en conjunto a un proceso productivo. (Aguirre, Müller, & Sebastian, 2008)

Una cantidad de materiales que se utilizan para facilitar la producción o para satisfacer las demandas del consumidor. (Burbano Arias, 2011).

La definición que se utilizara para este estudio será la de (Aguirre, Müller, & Sebastian, 2008), ya que en la mayoría de los estudio empíricos consultados, se menciona que los componentes automotrices, pasaran a un proceso productivo por cada una de las estaciones de trabajo.

Estudio 1

En el caso presentado por (Aguirre, Müller, & Sebastian, 2008), presentan la problemática de una empresa automotriz de Latinoamérica, la cual con el constante aumento de la demanda de autopartes, ha motivado a los directivos a mejorar la productividad asociada a tres problemas

- a) Baja satisfacción por parte del cliente por la tardanza en su producto
- b) Gran volumen de trabajo de inventario en proceso
- c) Estaciones de trabajo sin balanceo

El principal objetivo se puede resumir en mejorar la capacidad productiva de manera de que las entregas puedan ser satisfechas en tiempo y forma.

Se pensó que para mejorar este problema se desarrollara un modelo de programación línea, pero debido a que es una herramienta que no considera la lógica operativa compleja y ni es capaz de manejar la incertidumbre en los datos del problema. Se prefirió adoptar la simulación de eventos discretos para representar todo el proceso del mundo real en una forma integrada. Haciendo posible identificar las dificultades y desafíos, así como también poder validar las posibles hipótesis y alternativas de inversión de ser necesarias.

La principal ventaja en el uso de la simulación es que permite reproducir sistemáticamente los procesos complejos de la empresa en una forma abstracta e integrada, en la cual se puede visualizar el comportamiento dinámico de sus elementos a lo largo del tiempo.

Para este caso se utilizó el simulador simul8, en el cual se identificaron cuáles son las materias primas del proceso, las familias de productos y sus procesos.

Las cuales los procesos de producción fueron definidos de acuerdo a la secuenciación de cada familia de productos.

Así como también se definieron los tamaños de lotes, en base a las capacidades de cada locación, se consideraron los turnos, los recursos operativos y estaciones que se encontraban disponibles.

A través del desarrollo del modelo fue posible identificar las restricciones que tenía el sistema entre las cuales se detectaron el máximo tamaño de lote para cada familia, la mano de obra disponible, así como también factores externos como, faltantes de materiales y la variabilidad de la demanda.

Como resultados que se obtuvieron fueron de las operaciones críticas que generaron cuellos de botella, las cuales el principal objetivo era ser eliminados mediante el balanceo de las cargas de trabajo, así como también en base a las diferentes políticas de inventario que se fueron comprobando y la mejor mezcla de productos.

Por medio del simulador fue posible determinar:

- a) Los tamaños de lotes de cada familia de producto
- b) El inventario en proceso de cada máquina que se necesita cuando hay un cambio de producto
- c) Eficientizar la asignación de los recursos a cada una de las maquinas

Estudio 2

La siguiente investigación es una descripción de un área de prueba que fue sujeto a un análisis usando simulación. Los objetivos del estudio debían determinar si habría una necesidad inventarios y por lo tanto un tamaño de lote y para determinar el mejor modelo de operación con respecto al control del tráfico en las pruebas zona. (Jararaman & Ali, 1997).

Para desarrollar el modelo de simulación se utilizó el software WITNESS. El área de reparación opera fuera de línea donde los motores se mueven fuera del transportador para su reparación. En el sistema el rendimiento se midió en el número promedio de trabajos Producido por hora (JPH). El tiempo empleado por un banco de pruebas fue reparar un motor en 57 segundos, en los cuatro modelos. El tiempo para reparar un motor rechazado se distribuye de forma triangular con una probabilidad valor de 5 minutos (y el tiempo mínimo fue de 2 minutos y el tiempo máximo fue de 8 minutos). Todos los transportadores operado a una velocidad de 20 pies / minuto. Una tasa de rechazo total del 3% se utilizó en los tres puestos de prueba creando rechaza de forma aleatoria. Se asumió que todos los motores rechazados podrían repararse en el área de reparación. En otras palabras, no hay ningún desecho.

El objetivo de la estudio fueron para determinar el mejor modo de operación (Modo 1 versus Modo 2) y el tamaño del lote. Los escenarios alternativos son resumidos de la siguiente manera:

Escenario 1: Operación Modo 1 se usó sin inventario en puestos de prueba, con motores en el punto A hasta el área de pruebas está disponible.

Escenario 2: Operación Modo 2 se usó sin inventario en puestos de prueba por lo tanto, circulando motores en el circuito hasta que una área de pruebas esté disponible.

Escenario 3: se usó el Modo de Operación 1 pero, un inventario para cada soporte de prueba se agregó B1, B2 y B3. Si las áreas de prueba están ocupados, entonces los motores se puede en rutar a un área vacía. En el modelo de simulación, toma 5 segundos para que un motor sea transferido desde el área vacía al soporte. Esto reduce el tiempo de inactividad de los stands debido a falta de motores no probados esperando ser transferidos inmediatamente al soporte cuando esté disponible.

Escenario 4: se usó el Modo de Operación 2 pero, un inventario para cada soporte de prueba se agregó como B1, B2 y B3. Por lo tanto, los motores no probados

circulan de forma continua e ingrese un área de pruebas, si uno se vuelve disponible.

Además, se da prioridad a un motor esperando el momento para ser enrutado. Sin embargo, toma cinco segundos para que un motor sea transferido desde el área vacía al área de pruebas a través de él.

Se usaron números aleatorios comunes a través de los cuatro modelos con el fin de reducir la variación entre la simulación. Cada modelo fue simulado por un período que representa 1000 horas de producción. En cada simulación, las primeras dos horas se designaron como periodo de calentamiento. Se asumió que ninguna de las pruebas se encuentra con desgloses aleatorios experimentados. Los resultados de las ejecuciones de simulación se resumen en el siguiente tabla (la confianza no se informa ya que son tan pequeños que no afectaron la clasificación relativa de los resultados).

Claramente, en el segundo escenario, el promedio capacidad de rendimiento del sistema se determinó que era 178.05 JPH que es una mejora significativa sobre escenario 1. Esto puede explicarse por el hecho de que para la mayoría de las partes, las áreas de prueba no tendrán que esperar a que los motores viajen desde el punto A después de liberar un puesto. Como evidente, el ahorro en tiempo de viaje conduce a una mejora de 60 JPH. Además, los resultados del escenario 1 son mejorados mucho a 171.4 JPH en el escenario 3 con la adición de inventario al sistema. De alguna manera contra intuitiva, la capacidad de rendimiento promedio de la el sistema se determinó que era 172.3 JPH en el escenario 4 con una pérdida sobre el Escenario 3. El aumento del tiempo de transferencia desde el inventario al puesto de pruebas provoca la pérdida de rendimiento como los motores de los inventarios tienen prioridad sobre aquellos que están llegando al circuito por primera vez.

De los experimentos de simulación en la prueba área, se determinó que el Escenario 2 era el mejor entre los investigados.

2.2.4 Takt Time

Definición

El takt time, es el tiempo de trabajo disponible dividido por el número de unidades terminadas necesarias en ese periodo de tiempo. (Duannmu & Taaffe, 2007). El takt time en producción ayuda a eliminar el inventario innecesario de las líneas de producción, generando un proceso productivo más fluido.

Takt time se define como la cadencia en la cual un producto debe ser fabricado para satisfacer la demanda del cliente. (Chase, Jacobs, & Aquilano, 2010).

La palabra Takt tiene sus orígenes en el idioma alemán que literalmente significa paso o ritmo. Cuando hablamos de Takt Time queremos entender el ritmo al que necesitamos producir nuestro producto para poder satisfacer la demanda del cliente. (Pereira, 2016)

La definición que se utilizara en este estudio es la de (Duannmu & Taaffe, 2007), ya que uno de los indicadores productivos que se va a manejar en este estudio es cuantas unidades terminadas son necesarios en un periodo de tiempo determinado.

Estudio 1

Los resultados que se esperan en este caso de estudio (Duannmu & Taaffe, 2007) es mejorar la productividad por medio de productos terminados, mejorar la calidad y reducir los desperdicios.

El software que se utilizó para simular el proceso fue arena y el Opt QUEST, para las optimizaciones.

La empresa llamada ABC, produce dos tipos de productos, producto 1 y producto 2. Diariamente se producen 4 productos 1 y 16 productos 2.

En la simulación del modelo, existen 6 tipos de componentes principales en las líneas de producción.

Figura 7 Estaciones de Trabajo con sus respectivos Takt's Time

Station name	Daily Throughput	Takt time	Item list
Pre-Treat	4	146.67	1b
	4	146.67	1c
	16	36.67	2b
	20	29.33	(4) of 1a, (16) of 2a
Common Stage	44	13.33	(4) of 1a, (4) of 1b, (4) of 1c, (16) of 2a, (16) of 2b
Custom 1	4	146.67	1a
	4	146.67	1b
	4	146.67	1c
	16	36.67	2a
	16	36.67	2b
Assembly 1	4	146.67	1ab
	16	36.67	2ab (or just 2)
Check	20	25.88	(4) of 1ab, (16) of 2
Custom 2	4	146.67	1ab
	16	36.67	2
Assembly 2	4	146.67	(4) of 1ab, (4) of 1c
	4	146.67	
Final Check	4	146.67	1
	16	36.67	2

Fuente: Duannmu, J., & Taaffe, K. (2007)

El modelo de simulación es construido de acuerdo al sistema descrito anteriormente, simulado por 1000 horas con 100 horas de precalentamiento. El modelo se ejecutó una vez.

Después de la simulación, se encontró que el desempeño del sistema actual no es el adecuado, ya que en base a los takt time y tamaños de lotes, el rendimiento del sistema es casi 0, incluso después 70 horas de haber ejecutado el modelo se encontraron cuello de botella.

Por lo tanto se puede decir que las cargas de trabajo tampoco son balanceadas.

Otra de las cosas que se encontraron fue el que existen estaciones de trabajo donde están esperando alguna pieza para ser ensambladas.

Con el takt time actual solo se cumple con el 70% del plan de producción.

Las modificaciones que se hicieron en el sistema simulado fueron las siguientes:

Asegurar que el número total de componentes se puede mantener en toda la línea de producción para cada etapa de producción sin obstruir las líneas de producción compartidas.

Se añadieron contadores para cada componente para limitar el número máximo de inventario en proceso en cada etapa de producción. La variable de control es el número máximo de cada componente. El motivo por el cual se controla el inventario en proceso es para evitar los bloqueos en las estaciones de trabajo.

La siguiente mejora fue:

Controlar la secuencia de los componentes que ingresan al sistema

Los componentes se mantienen en un ciclo de la siguiente manera:

Paso 1: 1 Producto 1a, 1 Producto 1b, 1 Producto 1c,

Etapas 2: 1 Producto 2b, 1 Producto 2a,

Etapas 3: 1 Producto 2b, 1 Producto 2a,

Etapas 4: 1 Producto 2b, 1 Producto 2a,

Paso 5: Vuelva al paso 1.

Este ciclo puede ayudar a todos los elementos a fusionarse rápidamente en el ensamble.

Lo que se busca con estas modificaciones es que cada estación se mantenga ocupada y operando para mantener un alto nivel de rendimiento

Se agregó inventario en proceso en cada una de las etapas de ensamble, para que el producto esté disponible. Esto asegura el rendimiento de las estaciones, pero es lo opuesto a la regla de producción del sistema de Toyota.

Se redujeron los tiempos de ciclo, disminuyendo los tiempos de proceso de cada estación de trabajo y bajar los niveles de inventario en proceso, en esta parte se dejó que el PROQUEST seleccionara los niveles óptimos de estos indicadores.

Se corrieron 5 escenarios con diferentes modificaciones, los cuales se describen a continuación y sus mejoras.

Escenario 1. Agregando Inventario en proceso

En el modelo se agregó inventario entre cada una de las estaciones de trabajo, esto ayudo al sistema a lograr un mayor rendimiento en las estaciones. Sin embargo esta es una solución momentánea, ya que se buscaran otros métodos alternativos de solución.

Se aumentaron las capacidades en las estaciones de trabajo.

El sistema puede alcanzar un rendimiento cercano al 100% siempre y cuando tenga un takt time constante, donde cada estación se encuentre ocupada.

Escenario 2. Reducción de los tiempos de procesamiento antes y después de las estaciones comunes.

Con este enfoque se mejoró el 95% del rendimiento previsto. Se eliminaron los cuellos de botella y los pedidos fluyeron. Se encontró que existen órdenes en espera (al inicio del sistema), pero estas no se cuentan porque no inician para procesarse.

Escenario 3. Tiempos de procesamiento reducidos

En el modelo que se desarrolló, el software Arena, selecciono los tiempos de procesamiento después de los cuellos de botella en su límite inferior, dando lugar a un 50% de reducción en los tiempos de procesamiento. El rendimiento se mejora de 9 a 17 unidades.

Escenario 4. Combinación de inventario en proceso y de tiempo de ciclo antes de estaciones en común

Al agregar el inventario en proceso se reducen los tiempos antes de las estaciones en común de trabajo, se observa un desempeño similar en la secuencia planificada.

Escenario 5. Optimización del modelo

En el modelo, se definieron diferentes rangos de tiempos de procesamiento y tamaños de inventario, se usó el OptQuest, para encontrar la solución óptima.

Se simuló dos tipos de modelos un modelo pull, es decir se va procesando en serie como van llegando las piezas al sistema pero se encontró que un sistema así tiene un utilización del 12-99% y en un sistema MRP es decir se procesa en base a un plan de producción, se alcanza casi el 100% del rendimiento.

Estudio 2 Takt time

El objetivo de este trabajo es determinar qué variables, que tienen más influencia sobre un sistema de producción automatizada. Las cuatro variables analizadas fueron: número de tablas ensambladas, capacidad de inventario, tiempo de operación y tiempo de operación de las tablas de montaje. (Barra & Ferreira, 2007)

Estas variables fueron seleccionadas porque fueron señalados por los especialistas de la realidad sistema como estratégico. Para la ejecución de este estudio, una línea de montaje en una empresa fabricante del sector automatizado.

El sistema productivo que enfoca el estudio produce cuatro familias de partes, un total de 900 partes diarias. Sin embargo, con fines de investigación, se eligió una familia de productos, refiriéndose a la producción de 549 unidades por día. Tal elección se justifica por el hecho de que esta familia parte encarna una mayor Cantidad de procesos, además de pertenecer a la clasificación A, en términos de clasificación de inventario ABC.

Para la realización de este trabajo, el software Promodel fue utilizado, este paquete incorpora tres programas principales: Promodel (para simulación de eventos discretos), SimRunner (para la optimización de modelos de optimización), y Stat :: Fit (para estudios de distribución de probabilidad).

Los tiempos de procesamiento se midieron en el objeto de estudio e insertado en el software Stat :: Fit con el objetivo de obtener las distribuciones de probabilidad

La información requerida del objeto de estudio para la construcción de modelos de computadora se definió como: Cantidad de piezas producidas; Demanda diaria en los meses de abril, mayo, junio y julio (figura 7); Tamaño del lote; Número de operadores, Takt time, tiempos de paro, número de máquinas y capacidad de producción (figura 6).

Los resultados que se obtuvieron con la simulación del proceso fueron los siguientes véase tabla 8 y 9:

Tabla 8 Resultados de la simulación

Parámetros	Modelo Real	Modelo Simulado
Promedio de Partes Producidas Diarias	549	522
Takt Time	55 s	58 s
Estaciones	18	18
No. De Partes	7	7

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 9 Resultados de la simulación

Producción Total		
Meses	Modelo Real	Modelo Simulado
Mayo	10,357	10,500
Junio	9,616	8,681
Julio	10,643	8,895

Fuente: Elaboración Propia

Después de la simulación se hizo un diseño de experimentos el cual se explica a continuación:

Los factores seleccionados para el trabajo corresponden a aquellos el equipo definido como el más probable de tener contribución en la cantidad total de piezas producidas por el sistema.

Factor A: Capacidad del inventario: este factor expresa el cantidad de piezas dispuestas en las tarimas, lo que un nivel operativo elevado a las mesas de operaciones y el cumplimiento del tiempo de takt de 50 segundos.

Factor B: Número de tablas de ensamblaje: este factor mide el número de mesas de reunión situadas alrededor el transportador.

Factor C: tiempo de operación: este factor mide el tiempo de funcionamiento de las tablas de operaciones. Sus capacidades están dimensionadas para satisfacer la demanda diaria promedio de 549 partes.

Factor D: tiempo de funcionamiento de la mesa de montaje: responsable por la cantidad de piezas producidas diariamente.

En resumen, del experimento tabla 10:

Tabla 10 Diseño de experimento con sus factores y niveles

Factores	Nivel +	Nivel -
A: Capacidad de Inventario (Unidades)	60	100
B: Número de mesas (Unidades)	4	8
C: Tiempo de operación (min/parte)	0.6	0.9
D: Tiempo de la mesa de operación (min/parte)	N(6.35, 0.66)	N(7.35, 0.66)

Fuente: Elaboración Propia

Con el software minitab y con un grado de confianza del 95% se encontraron los siguientes resultados:

El factor B (número de tablas) es el más significativo, seguido por la interacción BC (número de tablas * tiempo de operaciones), por factor C (tiempo de operaciones), por la interacción BD (número de tablas * tabla operativa de tiempo), por la interacción BCD (número de tablas * preplug tiempo de operaciones * tiempo de funcionamiento de la tabla), y por interacción CD (operaciones de horario * funcionamiento de la tabla hora).

2.2.5 Mezcla de Productos

Definición

La mezcla de productos se refiere al número de líneas de productos que ofrece una compañía. Las empresas incrementan su mezcla de productos para diversificar los costos de producción, además de generar ventas y elevar utilidades, mediante la atracción compradores con preferencias diferentes. (Corichi & Cerón, 2000)

Es un conjunto de materias primas que tienen que pasar por un conjunto de estaciones de trabajo. En donde en cada estación de trabajo realiza un conjunto predefinido de procesos, para generar variedad en sus productos, los cuales a su vez dependen de la velocidad de la línea de montaje. (Tiacchi & Saetta, 2007)

La mezcla de productos, también es conocida como la variedad de productos, se refiere al número total de línea de productos que una empresa puede ofrecer a sus clientes. (Valero, Garcia, Coronado, & Hernandez, 2011)

La definición de (Valero, Garcia, Coronado, & Hernandez, 2011), ya que en los estudios que se revisando de la secuenciación es una de la variables principales que se utiliza, ya que la variedad de productos, genera un mayor número de clientes, que esto a su vez se traduce en ganancias para la empresa, siendo uno de los indicadores financieros que se va a tratar en esta investigación.

Definición

La mezcla de productos se refiere al número de líneas de productos que ofrece una compañía. Las empresas incrementan su mezcla de productos para diversificar los

costos de producción, además de generar ventas y elevar utilidades, mediante la atracción compradores con preferencias diferentes. (Corichi & Cerón, 2000)

Es un conjunto de materias primas que tienen que pasar por un conjunto de estaciones de trabajo. En donde en cada estación de trabajo realiza un conjunto predefinido de procesos, para generar variedad en sus productos, los cuales a su vez dependen de la velocidad de la línea de montaje. (Tiacchi & Saetta, 2007)

La mezcla de productos, también es conocida como la variedad de productos, se refiere al número total de línea de productos que una empresa puede ofrecer a sus clientes. (Valero, Garcia, Coronado, & Hernandez, 2011)

La definición de (Valero, Garcia, Coronado, & Hernandez, 2011), ya que en los estudios que se revisando de la secuenciación es una de la variables principales que se utiliza, ya que la variedad de productos, genera un mayor número de clientes, que esto a su vez se traduce en ganancias para la empresa, siendo uno de los indicadores financieros que se va a tratar en esta investigación.

Estudio 1

Lo que se hizo primeramente para solucionar este problema fue definir las variables del problema, tales como (Tiacchi & Saetta, 2007):

- Tareas principales, es el número de tareas que se llevan a cabo para completar cada producto.
- Centros de trabajo, es el lugar donde cada operario, tiene que desarrollar una o más tareas.
- Tiempos de ciclo, es el tiempo promedio que le toma al proceso en completar un modelo de automóvil.
- Tiempo que toma en desarrollarse cada modelo, es el tiempo que le toma a cada estación procesar en cada estación su producto respectivo.

Teniendo estos datos, se simula en los paquetes de JavaSimulation el cual se utiliza para simular eventos discretos y SSJ mientras que es un set de herramientas que facilitan la programación en Java.

El motivo por el cual se utilizó la simulación es porque se puede especificar la secuencia de los modelos de automóviles a través de la línea de producción, se puede visualizar como los tiempos de ciclo de cada automóvil, se van modificando sin necesidad de modificar el tiempo actual, aparte que se puede visualizar la complejidad del sistema real y como cada estación esta interactuando entre ellas.

Lo que se pretende con la simulación es encontrar cual es la mejor mezcla de productos en base a unidades terminadas, reduciendo sus tiempos de ciclos, inventario en proceso, así como también los tiempos que le toma avanzar en cada estación.

Los fabricantes de automóvil la secuencia de montaje varía rápidamente debido a que el sistema tiene que adaptar su producción a la demanda dinámica usando un producto que cambia permanentemente.

En cualquier etapa del sistema se producen una gran variedad de ítems.

En el estudio se realizó una simulación con SIMIO para analizar la secuenciación de las líneas de montaje las cuales dispone de cuatro líneas en paralelo y manejan mezclas de productos.

En la simulación se utilizaron las siguientes consideraciones

- Estrategia de Entrada: Ordenación por Modelo y Motor. Se han clasificado todas las unidades según dos características Modelo (Grande o Pequeño) y Motor (Diesel o Gasolina). De esta manera existen cuatro combinaciones posibles y por tanto cada una de ellas se asigna a una de las líneas en paralelo. Si la línea correspondiente está llena, se envía a aquella que dispone de más huecos vacíos.

- Estrategia de Salida: La estrategia de extracción es el mecanismo por el que un producto es el siguiente a introducir en la secuencia de salida, teniendo en cuenta los que están en cabecera de línea en cada momento. En esta simulación la estrategia era: de manera aleatoria teniendo en consideración que se cumplieran una serie de restricciones propias de la línea de montaje. Estas restricciones son del tipo de la aparición de determinadas opciones en cada tramo de la secuencia.

Con esta simulación se pudo obtener:

- Una regla heurística de secuenciación de producción
- El número óptimo de líneas de ensamble paralelos
- El impacto que tuvo el nivel máximo de llenado de los almacenes.

2.2.6 Tiempo de Ciclo

Definición

El tiempo de ciclo de una línea es el tiempo máximo permitido para trabajar en la elaboración de una unidad en cada estación. Si el tiempo requerido para trabajar con los elementos de una estación es mayor que el tiempo de ciclo de la línea, entonces seguramente habrá cuellos de botella en la estación, los cuales impedirán que la línea alcance su tasa de producción deseada. (Carro Paz & González Gómez, 2004)

(Phani, Kamala, & ACS., 2013) Definen los tiempos de operación como la suma de tiempos entre cada estación que le tomar una materia prima ser procesada desde la primera estación de trabajo hasta la última que necesita para ser un producto terminado.

El Tiempo de Ciclo describe cuánto tiempo toma completar una tarea específica desde el comienzo hasta el final. Esta tarea puede ser desde ensamblar un

programa o contestar una llamada de un cliente. Y se puede profundizar aún más y segregarlo en Tiempo de Ciclo con Valor Agregado y Tiempo de Ciclo sin Valor Agregado. (Pereira, 2016).

La definición que se va utilizar para este estudio es la de (Carro Paz & González Gómez, 2004), ya que esta variable es una de las más importantes y va de la mano con los cuellos de botella, ya que si se llega a tomar más del tiempo permitido para trabajar en una estaciones de trabajo generara cuellos de botella y por lo tanto la producción deseada no se verá reflejada al final de la línea de ensamble final, afectando los indicadores productivos.

Estudio 1

La industria automotriz en Tailandia está bajo presión constante para mejorar el rendimiento de producción, ya que se desea eliminar los cuellos de botella de producción y mejorar los tiempos de ciclo del proceso. (Trakultogchai, Supsomboon, & Limtanyakul, 2013)

Esta investigación presenta cómo se usó la herramienta de simulación con el objetivo de reducir el problema del cuello de botella en un proceso de pintura de un proceso de secuenciación de producción.

Con la creciente demanda de automóviles de lujo de una empresa alemana establecida en Tailandia se ha visto forzada a aumentar la capacidad de producción en esta región. La compañía predice un aumento en la producción de un 20% en los próximos años. Uno de los objetivos también de esta empresa es que en cada estación de trabajo se logre un tiempo estándar de 10 minutos. Sin embargo, este objetivo a sido difícil de alcanzar.

La idea principal de esta simulación es optimizar el sistema de producción y reorganizar las estaciones de trabajo para reducir el cuello de botella en el sistema y hacer un mejor flujo en las estaciones de trabajo.

Uno de los pasos importantes de esta simulación es la obtención de datos. En un total de siete estaciones la información que se necesitó fue la siguiente: tiempos de arribo, tiempos de procesamiento, capacidades, tiempo de transferencia entre el horno y pintura.

Las diversas alternativas en esta investigación se centraron en reorganizar las estaciones de trabajo, dividiendo la tarea de cada estación y reducir el cuello de botella.

Se diseñaron tres modelos alternativos a partir del Modelo A (sistema actual). En este modelo apareció un cuello de botella en proceso de pintura donde se ponen dos capas. Una posibilidad de reducir el tiempo de procesamiento fue dividir las tareas de la estación en dos estaciones, donde la primera estación se utiliza para la primera capa de pintura y el espacio entre la segunda estación se utiliza para la pintura de la segunda capa; en el Modelo B se agregaron las configuraciones que se utilizan para los colores; en el Modelo C se elimina la estación de limpieza para tener otro espacio de trabajo; en el Modelo D se consideró reducir el tiempo de procesamiento de la estación del primer recubrimiento, la tarea de inspección se dividió entre la estación de primer recubrimiento y secado.

Obteniendo los siguientes resultados en la simulación tabla 11.

Tabla 11 Resultados de la simulación

Modelo	Carros por día	Tiempo de Ciclo (Minutos)
A	35	20
B	45	15
C	47	15
D	50	10

Fuente: Elaboración Propia

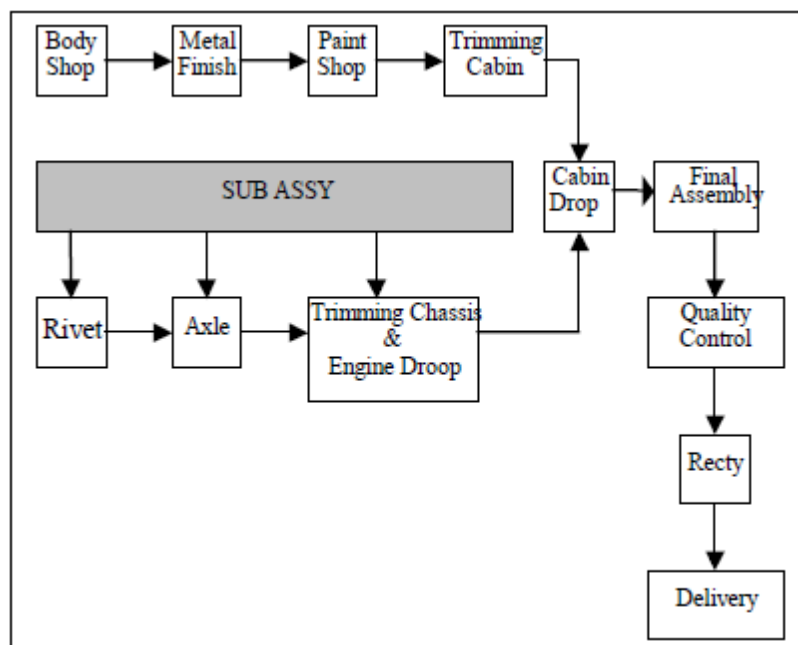
El desarrollo del modelo fue medido en base el número de carros producidos por día. El resultado del Modelo D es una de las mejores alternativas. Se demostró que los cuellos de botella fueron reducidos y se mejoró el flujo de trabajo de las estaciones en comparación del Modelo A y D.

Estudio 2

(Wirabhuaana, Haron, & M., 2008) En este estudio se presentan cuatro simulaciones propuestas de una línea de ensamblaje de camiones, se basan en tres indicadores, balanceo de línea, operaciones en paralelos y manejo de materiales, todos sincronizados. Los resultados de la simulación se consideraron en función de los productos terminados, el tiempo de ciclo y la eficiencia de la línea. El software que se utilizó para simular fue Arena.

El modelo simulado es el siguiente figura 8:

Figura 8 Modelo simulado



Fuente: Wirabhuaana et al (2008)

Los resultados fueron los siguientes, de acuerdo a los tres indicadores establecidos.

El primer indicador productos terminados

El modelo actual produjo 29 productos por día mientras que el primer modelo solo acomoda 28 unidades diarias.

Aunque el primer modelo podría tener una línea más alta eficiencia, pero la capacidad de producción es menor que la modelo actual. En el segundo modelo, produjo hasta 43.5 unidades por día o alrededor de un 50% más que la inicial modelo. Esto probó que el funcionamiento paralelo en Metal la sección de acabado podría mejorar significativamente la producción capacidad. El tercer modelo podría dar 6 adicionales producto diario o aproximadamente 14% más que el segundo modelo. Con este sistema propuesto, 49.5 unidades diarias la capacidad de producción puede lograrse satisfactoriamente. El cuarto modelo puede aumentar el estándar de salida diaria en 56 unidades por día, que es un 13% más alto, que el modelo anterior y más del 93% más alto desde el modelo inicial

El segundo indicador Tiempo del ciclo del producto

Es el tiempo, que se define como el intervalo de tiempo entre los productos terminados creado al final de los procesos de fabricación.

El tiempo estándar de la estación de trabajo y el tiempo de transferencia son los más elementos importantes en el tiempo del ciclo del producto terminado

El tiempo de ciclo del modelo inicial es 22.5 minutos por producto. Los modelos de simulación reducían el tiempo de ciclo desde el primer modelo hasta el cuarto modelo que es: 20, 17.9, 9 y 8 minutos por producto respectivamente. Significa que el ciclo del producto el tiempo puede reducirse totalmente hasta el 60% en el cuarto modelo.

Comparación del primer y segundo parámetro

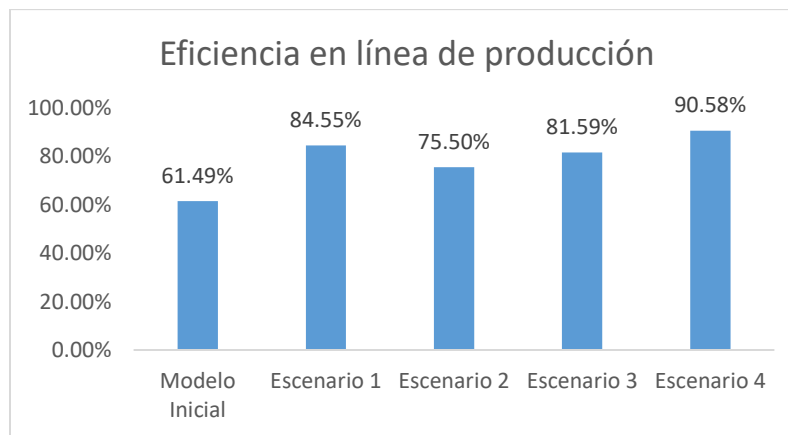
El tercer modelo dio la mayor cantidad mejora significativa de 17.9 minutos reducidos casi 50% a 9 minutos por producto. Desde el segundo el modelo aplica procesamiento paralelo mientras se aplica el tercer modelo proceso automatizado,

por lo que se puede determinar que paralelo procesamiento mejorará significativamente la producción capacidad, pero la automatización del proceso afectará principalmente.

El tercer indicador es la eficiencia de la línea de producción

La grafica 3 ilustra la eficiencia de la línea de fabricación entre el modelo actual y cada modelo de simulación. Primer modelo que aplica equilibrio de línea dio el mayor mejora significativa en la eficiencia de la línea del 61.49% en el modelo actual hasta el 84.55% en el segundo modelo (37.5% mejora).

Gráfica 3 Eficiencia en la línea de Producción



Fuente: Elaboración Propia

Estudio 3

(Quingsong & QU, 2009). El siguiente caso se basa en la producción real situación de una fabricación de equipos pesados:

Hay 6 máquinas numeradas de P1 a P6. Recibió las 5 órdenes de producción durante 10 días, y la llegada de pedidos es aleatoria. Los procesos, el tiempo de procesamiento y la cantidad de órdenes de cada producto son diferentes. El objetivo es hacer que tiempo de procesamiento total más corto. Establecer un modelo de simulación con el software Witness, y luego calcular el mejor programa de producción.

El objetivo final de establecer un modelo de programación es para calcular los procesos que hacen el tiempo de producción más corto. Entonces, una prioridad de procesamiento inicial para cada parte ha sido configurado, entonces la relación lógica entre los elementos se ha definido. Por último, la mejor prioridad de cada parte durante el tiempo se ha calculado con el módulo de optimización. De acuerdo con la prioridad calculada, el mejor tiempo de procesamiento de todas las partes podría obtenerse.

En el modelo de simulación, se configuraron las llegadas de las partes activas y aleatorias dentro del tiempo limitado. Cada máquina corresponde un inventario. Las partes deben alinearse con el inventario antes de cada proceso. Cuando la máquina está inactiva, la partes parte en el inventario puede ingresar al proceso. Debido a cada parte se establece en una prioridad inicial, la parte con alta prioridad en el inventario se envía al proceso. La prioridad de cada parte es asignado por variable en el sistema, es decir, durante el simulación las prioridades se pueden cambiar. Cuando todas las partes han sido procesadas, se registra el tiempo total de cada variable

En este modelo, las prioridades iniciales de todas las partes son 0. El total el tiempo de procesamiento de todas las partes es 2726h. La utilización de P1 a P6. Véase figura 9.

Figura 9 Resultados de la simulación

Name	No. of operation	Idle (%)	Busy (%)
P1	36	44.97	55.03
P2	7	72.49	27.51
P3	8	21.50	78.50
P4	6	78.50	21.50
P5	26	80.85	19.15
P6	8	56.13	43.87

Fuente: Quingsong et al (2009)

Es difícil resolver el problema por solo métodos matemáticos. Es necesario usar otros algoritmos de optimización para reducir el espacio de la solución y obtener los mejores resultados.

En este modelo, primero establezca las variables de decisión (el prioridades de todas las partes) y la función objetivo (la el tiempo de procesamiento total más corto) en el módulo de optimización, y luego ejecuta el módulo de optimización.

En este caso, use su Algoritmo incorporado: Adaptable Termostatistical (SA), y luego después de 236 búsqueda el tiempo mínimo de ciclo fue 2396 horas. Véase figura 10.

Figura 10 Resultados de la simulación

Name	No. of operation	Idle (%)	Busy (%)
P1	36	37.40	62.60
P2	7	68.70	31.30
P3	8	10.68	89.32
P4	6	75.54	24.46
P5	26	78.21	21.79
P6	8	50.08	49.92

Fuente: Quingsong et al (2009)

2.2.7 Tiempo de Operación

Definición

Es el tiempo consumido por los recursos en efectuar la operación y es el tiempo que agrega valor a las materias primas (Carro Paz & González Gómez, 2004).

Es el intervalo de tiempo necesario para completar una orden de trabajo, con determinadas estaciones de trabajo (Mucientes, Vida, Bugarin, & Manuel, 2008)

Es el tiempo referido de mano de obra (tiempo operario) y a los medios de explotación (tiempo maquinaria). (Pereira, 2016).

La definición que se va usar es la de (Mucientes, Vida, Bugarin, & Manuel, 2008), ya que en los estudios revisados, involucran los tiempos de las estaciones de trabajo y como estos determinan la utilización de las estaciones y recursos a lo largo de las líneas de ensamble.

Estudio 1

La simulación es un herramienta que ayuda a analizar y resolver problemas de una realidad de producción que usa la tecnología aplicada. (Phani, Kamala, & ACS., 2013)

Para el problema de la secuenciación de la producción se decidió en este estudio usar el software Flexim, Con el principal objetivo de simular el tiempo de inactividad de las máquinas y obtener el máximo de su utilización. Con flexim se pretende optimizar la programación de los componentes, los tiempos de paro, los tiempos de proceso de cada máquina las cuales son las restricciones consideradas para este estudio.

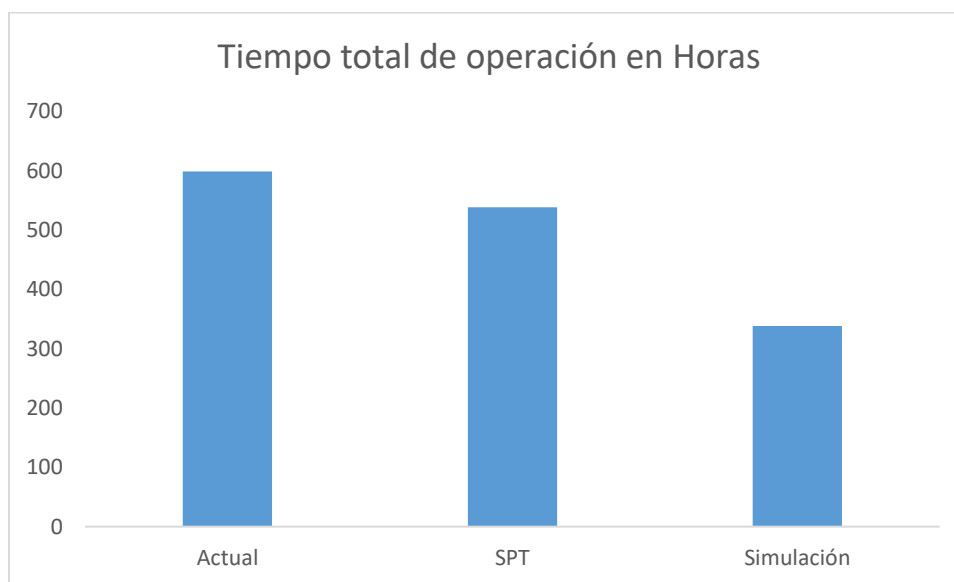
Para poder reducir los tiempos de proceso en las estaciones de trabajo se consideró la regla del procesamiento más corto (SPT), la cual implica que le trabajo más corte se maneja primero y se completa. La filosofía es conseguir los trabajos que implican un tiempo de procesamiento menor, para que se cree una psicología de que está haciendo más productivo en las estaciones de trabajo, el problema con este enfoque es que los trabajos más grandes, que pueden ser más urgentes, se realicen más tarde.

Se calculó el tiempo de procesamiento total de todas las estaciones desde que la materia prima llega a la estación inicial de acuerdo a como las máquinas están secuenciadas. Considerando los tamaños de lotes actuales.

Para posteriormente calcular con la técnica SPT la reducción del tiempo de procesamiento total de las máquinas y después utilizar la técnica de la simulación con flexim obteniendo los siguientes resultados.

En la gráfica 4 se muestran los resultados que se obtuvieron con las dos técnicas utilizadas para este estudio.

Gráfica 4 Tiempo total de operación en Horas



Fuente: Elaboración Propia

En la gráfica 4, se muestra como de un tiempo que tiene actual de 599 horas, con la técnica de SPT se tiene un tiempo de 538.4 horas, en cambio con el uso de la simulación se pudo reducir a 338.3 horas.

Se puede concluir con el tiempo de proceso con el uso de la simulación en comparación con la técnica SPT se optimizó un 37% lo que representa 200.1 horas. Con la simulación se pudo reducir tiempo muerto de las máquinas y se incrementó su utilización.

Estudio 2

En otro estudio realizado por (Vajasuvimon & Supsomboon, 2014) utilizaron la simulación estudiar tres aspectos en una línea de ensamble automotriz, los cuales son:

- A) El principal problema en esta línea de producción era los niveles de utilización de la máquina y el operario insatisfecho debido al efecto del tiempo de inactividad surge en la línea de producción. Por lo tanto, la planta requiere el mejora y desarrollo del proceso de trabajo en la línea de producción de maquinaria lo más rápido posible.

En la construcción del modelo, la recopilación de los datos del proceso es un primer paso que requirió los datos necesarios para la creación del modelo.

B) Creación de Simulación

Tecnomatix Plant Simulation software V.10 licenciado por Siemens se aplicó para crear el modelo actual de línea de producción.

Los supuestos básicos del modelo se enumeran a continuación:

1. Cada trabajo tiene una ruta específica a través de las máquinas o no hay rutas alternativas, es decir, la operación de un trabajo puede realizarse por un solo tipo de máquina.
2. Cada máquina puede realizar solo una operación en un tiempo determinado
3. Una operación en cualquier trabajo no puede realizarse hasta que las operaciones previas en el trabajo se completan.
4. Servicio First-In-First-Out.
5. No hay interrupciones en el taller, ejemplo. No hay tiempos de paro
6. Tiempo de transporte entre diferentes máquinas y el tiempo de configuración en la máquina es insignificante.
7. Los trabajos son independientes el uno del otro

8. El tiempo de procesamiento es constante para todos los procesos.
9. Se trabaja por 6 días y se descansa un día.
10. El tiempo de trabajo (ocho horas de un turno o horas normales de trabajo con un tiempo de descanso de una hora, y si trabaja más allá de las horas normales de trabajo es horas extras) tanto de las máquinas y operarios.
11. Una máquina requiere un trabajador para operarla y un operario no puede operar más de una máquina

C) La validación del modelo es el proceso de garantizar que el modelo de simulación representa el sistema real en un determinado nivel de confianza. Este proceso usaría la estadística para confirmar la precisión del modelo.

La validez estadística implica un objetivo y comparación cuantitativa entre la producción el rendimiento del sistema real y el modelo.

Si no hay una diferencia estadísticamente significativa entre los datos entonces el modelo se considera válido. Por el contrario, si hay una diferencia estadísticamente significativa, entonces el modelo no es válido.

Hay muchos tipos de pruebas de hipótesis, por lo que deberíamos seleccionar la prueba de comparación apropiada. La prueba t fue utilizada para validar los resultados del sistema real y el modelo debido a la desviación estándar de la población era desconocido y la cantidad de muestra fue menor que treinta muestras. Hay tres parámetros que fueron validados en este proceso, que son porcentaje de tasa de rendimiento por día, utilización de la máquina y la utilización del operario. Representados en la tabla 12.

Tabla 12 Resultados de la simulación

Parámetros	Actual	Modelo	Valor P
Piezas por día	151.69	151.5	0.993
Utilización de las máquinas (%)	61.06	60.08	0.937
Utilización del Operario (%)	92.94	90.5	0.683

Fuente: Elaboración Propia

A partir de los resultados del valor p en cada parámetro, fueron más altos que 0.05 al 95 por ciento de confianza intervalo, por lo que no hubo diferencia estadísticamente significativa entre el sistema real y el modelo de simulación. Significó que el modelo fue capaz de ser representativo del sistema actual.

Se propusieron tres modelos alternativos con diferentes estrategias desarrolladas para aumentar la utilización, reducir los tiempos de inactividad y aumentar la tasa de producción con el menos costo. Cada estrategia fue creada mediante la gestión de operaciones para alcanzar los objetivos.

Estrategia A

Se reorganizaron algunas máquinas de la línea de producción, se agruparon estaciones de trabajo similares.

Estrategia B

Se utilizó la misma estrategia de A, pero se agregaron dos importantes estaciones para ampliar la capacidad.

Estrategia C

Para aumentar la tasa de producción, se decidió ampliar el tiempo de trabajo en la línea de producción a dos turnos. Para esta estrategia de agregar operarios se utilizó el principio del análisis del punto de equilibrio.

Los resultados de la simulación en cada modelo se compararon a través de tres variables principales las cuales son la utilización promedio de los operarios, los costos de operación y el tiempo de finalización de la producción tabla 13.

Tabla 13 Resultados de la simulación

Modelo	Cantidad de Operarios	Promedio de utilización de los operarios (%)	Costo	Tiempo de Finalización (DD:HH:MM:SS)
Actual	11	90.31	\$556,164	31:00:00:00
Modelo A	11	95.02	\$528,440	30:18:45:00
Modelo B	12	95.6	\$525,168	26:16:51:15
Modelo C	14	90.52	\$525,420	23:17:15:33

Fuente: Elaboración Propia

Los resultados mostraron que el Modelo C tiene mejor rendimiento que otros modelos en términos de costos de operación y tiempo de finalización de Producción mientras que el Modelo B exhibió superior rendimiento en términos de utilización promedio del trabajador.

Estudio 3

Warwick, T., & Tsang, E. (1995). El objetivo de este estudio es minimizar el tiempo de operación de las máquinas, las cuales tienen un determinado orden de secuencia, reduciendo a su vez su tiempo de ciclo. Para este estudio se utilizó el software arena.

Las suposiciones del modelo se pueden establecerse de la siguiente manera:

1. Los tiempos de procesamiento son deterministas.
2. Todos los trabajos están listos para ser procesados en el tiempo cero.
3. Solo se puede procesar un trabajo en cada máquina a un dado periodo de tiempo.
4. Cada trabajo visita cada máquina una vez como máximo.
5. Las máquinas están continuamente disponibles.
6. Solo hay una máquina de cada tipo.
7. No se permite la preferencia de las operaciones.
8. Se consideran los tiempos de transporte entre las diferentes máquinas
9. Se consideran los tiempos de paro.

Se construyó un modelo usando el software Arena. El modelo exportará cierta información a Microsoft Excel. Se utilizó el ejemplo de la solución que consta de 4 máquinas, para reprogramar el tiempo de procesamiento mínimo de estas estaciones. Figura 11 y 12.

Figura 11 Secuencia y tiempo de procesamiento

J \	Processing Sequence (Processing time)			
1	2(2)	1(1)	4(2)	3(1)
2	4(3)	2(1)	3(3)	1(2)
3	1(1)	3(3)	4(2)	2(1)
4	3(2)	2(2)	1(2)	4(3)

Fuente: Warwick et al (1995)

Figura 12 Trabajos y tiempos de procesamiento

Machine 1			
Job No.	Processing time	Start time	Finish time
3	1	0	1
1	1	2	3
4	2	4	6
2	2	8	10

Fuente: Warwick et al (1995)

Los resultados que se obtuvieron en la simulación fueron los siguientes, figura 13:

Figura 13 Resultados

TABLE 3. Optimum performance with their solutions

Problem	Size (jobs x machines)	Optimum or LB	FIFO	Proposed model			MRE
				No. of replications	Makespan	Time (min.)	
Ft06	6x6	55	65	100	59	0 + 0	5.45
				1000	58	1 + 1	
				2000	58	3 + 2	
Ft10	10x10	930	1184	100	1120	0 + 0	13.76
				1000	1075	2 + 1	
				2000	1058	3 + 3	
La01	10x5	666	772	100	690	0 + 0	3.6
				1000	690	2 + 1	
				2000	690	3 + 2	
La06	15x5	926	926	100	946	0 + 0	0
				1000	926	2 + 1	
La11	20x5	1222	1272	100	1272	0 + 0	0
				1000	1222	2 + 2	
La21	15x10	1046	1265	100	1228	0 + 0	12.7
				1000	1179	3 + 2	
				2000	1179	4 + 6	
Ta01	15x15	1231	1486	100	1385	0 + 0	12.5
				1000	1385	4 + 5	
				2000	1385	7 + 20	
Abz7	20x15	655	803	100	835	0 + 0	17.6
				1000	786	5 + 5	
				2000	770	8 + 25	
Yn1	20x20	846	1085	100	1056	0 + 0	20.8
				1000	1022	6 + 6	
				2000	1022	11 + 30	

Fuente: Warwick et al (1995)

Se generó un número de réplicas (repeticiones de la simulación), ya que se espera que el tiempo de procesamiento tenga más de una solución para ser aceptado. Se calculó un Tiempo de operación con error relativo (MRE) que se calcula en base al mejor MRE y el óptimo tiempo de procesamiento LB.

Por lo que en la tabla el dato MRE, representa el valor óptimo para cada uno de los productos que pasa por las diferentes estaciones.

Como conclusión de los estudios empíricos sustentados a cada variable, se puede decir que es factible utilizar estas variables en la simulación, las cuales serán las variables de entrada que se van utilizar, a lo largo de esta investigación.

Posteriormente se revisaran los métodos de obtención de los datos de entrada de estas variables, así como también el software en el cual se va simular y comprobar la hipótesis presentada, ya teniendo esto se definirán cuáles son los indicadores operativos y financieros que fueron afectados.

2.2.8 Cuellos de Botella

Definición

Un cuello de botella puede ser definido como cualquier recurso cuya capacidad es menor a la demanda requerida de él. En otras palabras, es un recurso que limita las piezas terminadas. En el punto en el proceso de producción donde el flujo tiende a ser más lento, los cuales pueden ser una máquina, operadores escasamente capacitados, herramientas especializadas, etc. (Goldratt y Cox, 1986).

Los cuellos de botella en una empresa pueden ser internos o externos y típicamente representan un proceso o un paso de capacidad menor y la tasa de producción (por unidad de tiempo) mayor, es decir, el tiempo total que dura un proceso de principio a fin. (Krajewski, L., & M., 2011)

Los cuellos de botella son aquellos recursos con los cuales se debe lidiar al momento de planificar la producción los cuales por lo regular son recursos limitados. (Krystek & Sara, 2016)

Se utilizara la definición de (Goldratt y Cox, 1986), ya que va muy de la mano con los tiempos de takt time, tiempos de proceso y tiempos de ciclo, ya que estas variables determinar cuántas piezas terminadas tienen que salir en determinado tiempo y se necesita identificar las estaciones de trabajo, operarios etc. Que generan un cuello de botella para optimizar estas variables y para tener más piezas terminadas, que es uno de los principales indicadores que se van utilizar en este estudio.

Estudio 1

(Ulgen & Ali, 1989). Se hizo un estudio que involucro el modelado y análisis del área de pintura de un proceso automotriz donde los objetivos de estudios fueron los siguientes:

Durante la fase del diseño conceptual:

- Evaluar el diseño conceptual de cada tiempo de ciclo y determinar los posibles cuellos de botella e identificar las posibles soluciones.

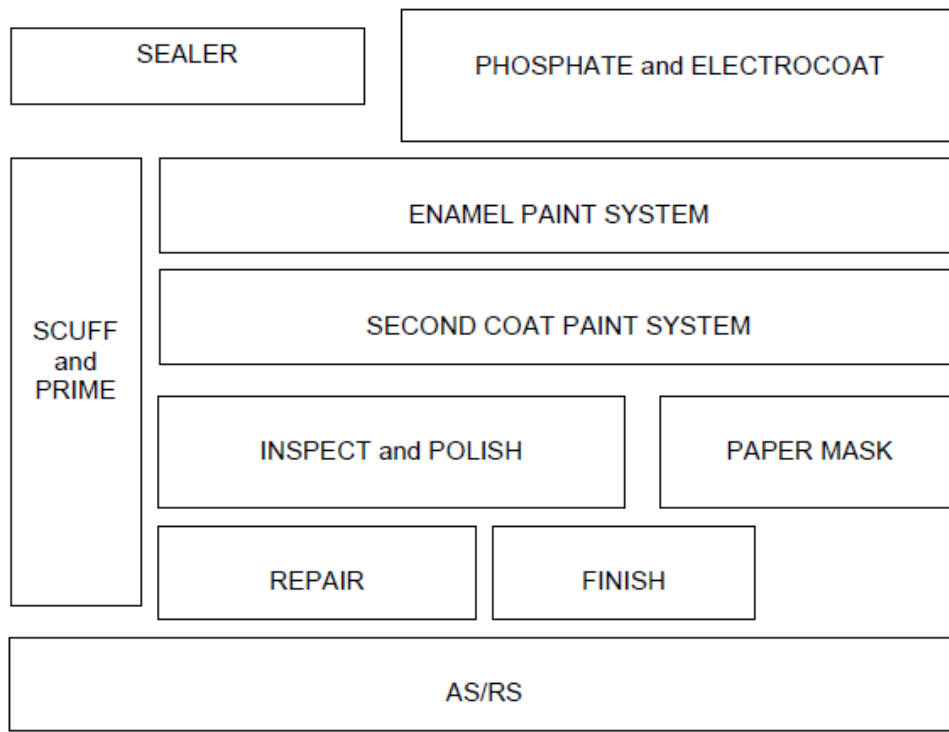
Durante la fase de diseño:

- Determinar la capacidad del sistema
- Evaluar la viabilidad de los turnos propuestos y la secuencia en el proceso de pintura
- Investigar los mejores niveles de stock en varios de sus productos AS/RS
- Analizar el impacto de los diferentes programas de operación en función de sus condiciones secuenciadas.

El sistema está conformado por los siguientes subsistemas secuenciados (figura 14):

- (1) electrocapa y fosfato, (2) líneas de sellador y horno de gel sellador, (3) cabina principal y horno principal, (4) principal cabina de esmalte y horno de esmalte, (5) líneas de inspección, (6) área de reparación puntual, (7) segunda capa cabina de pintura y horno, (8) líneas de reparación, y (9) el AS / RS.

Figura 14 Layout de Planta



Fuente: Ülgen et al (1989)

Los siguientes parámetros y variables se usaron el modelo de simulación:

- (1) velocidad de las bandas, espacios y datos de aceleraciones;
- (2) tiempos de ciclo en las líneas de reparación y mascara de espectro;
- (3) tiempos de ciclo en el área de reparación puntual;
- (4) mezclas de productos y pinturas
- (5) porcentajes de reparación mayor y menor.

El modelo requirió una rutina de programación en lenguaje Fortran y C. Ya que algunas unidades requerían pasar a través de las cabinas de pintura y tardaron más tiempo en estar listar para la entrega. Dada a la mezcla de productos se mostró diferencias significativas entre los turnos y las líneas de corte operaban con turnos diferentes, los trabajos que requerían un largo tiempo de procesamiento se

adelantaron a su secuencia original. Por lo tanto, aunque tomaran más tiempo que los otros trabajos estos eran completado, teniendo su posición original en la secuencia de montaje. Debido a la aleatoriedad de las tasas de defectos, existe la posibilidad de que algunas piezas perdieran su secuencia en el proceso de pintura. Por otra parte si se movieran muy adelantado a su secuencia, terminarían en proceso de pintura mucho antes que el resto de las unidades. Para poder protegerse de esas variaciones aleatorias. Se generó un inventario de seguridad entre el AS/RS. Este inventario se calculó en base al tiempo que le toma al sistema capturar todas las unidades de su secuencia original.

Las reglas que se consideraron para re secuenciar los trabajos son:

- Los trabajos con dos colores se adelantaron en 100 trabajos para dos tipos de productos
- Trabajos con tres colores fueron adelantados por 200 trabajos para un solo uno de los modelos.
- Un trabajo con más de un criterio de coincidencia se adelantó de acuerdo a la suma de los trabajos requeridos por cada criterio.

Algunas de las suposiciones del modelo fueron las siguientes:

- Se consideran los dos modelos de vehículo A y B. Los vehículos A tienen hasta dos capas de pintura, mientras que los vehículos modelo B tienen hasta tres capas de pintura.
- Las mezclas de los modelos se conocen y se consideran las restricciones del día.
- El porcentaje de reparación mayor es del 22% y el porcentaje menor es del 9%
- Los tiempos de reparación menores se distribuyen aleatoriamente entre 30 y 120 minutos. Las reparaciones importantes pasan por el segundo ciclo de pintura.

- Los tunos son conocidos y constantes. El primer turnos se dedica al modelo B y el segundo turno al A.
- Las bandas funcionan a toda velocidad.

El análisis del modelo implico una evaluación de las políticas alternativas de la secuenciación de trabajo para elegir alguno que pudiera ser eliminado en las líneas de corte. Además de la secuenciación el modelo se usó para validar la utilización de AS/RS

Con la simulación se pudo demostrar lo siguiente:

- No era necesario cambiar las secuencias del modelo B, ya que la planta decidió almacenar un día completo de inventario en el AS/RS.
- Con el modelo se demostró que durante el segundo turno de pintura, los trabajos que toman demasiado tiempo se pueden terminar al día siguiente en las líneas de corte.

La tabla 14 muestra los resultados con y sin cambios en la secuenciación. También se probaron diferentes niveles de inventario para el modelo A en el AS/RS. En los resultados de la tabla indican que un tamaño de inventario de 180 vehículos será suficiente para evitar los trabajos faltantes del modelo A. También se determinaron los tamaños de inventario para la utilización de AS/RS.

Con esto la planta tendría ahorro en costos para la reprogramación del modelo B.

Tabla 14 Resultados de la simulación

Total de Trabajos Perdidos por Semana				
Modelo A Tamaño de Lote	Con resecuenciación		Sin resecuenciación	
	1 recubrimiento	2 recubrimientos	1 recubrimiento	2 recubrimientos
135	120.32	16.29	0	115.76
160	14.75	4.43	0	56.45
170	1.09	4.21	0	40.32
180	0	0	0	30.2
200	0	0	0	12.29

Fuente: Elaboración Propia

Estudio 3

El ensamblaje es el proceso mediante el cual partes y subconjuntos de productos manufacturados se juntan para formar el producto terminado (Guetsch, 1990). Una línea de montaje manual es una línea de producción que consiste en una secuencia de estaciones de trabajo donde las tareas de ensamblaje son realizadas por trabajadores.

Los productos se ensamblan a medida que se mueven a lo largo de la línea.

En cada estación, una parte del trabajo total es realizado en cada unidad. La tasa de producción de un la línea de montaje está determinada por su estación más lenta.

El objetivo principal de este estudio (Ismail, Tai, & Leman, 2002), es mejorar la productividad y la eficiencia de un vehículo en la línea de montaje de asiento. La línea de montaje del asiento del vehículo estudiado es la línea de montaje final. El principal problema de la línea de montaje es el departamento de producción de la fábrica no tiene ningún horario estándar para el productos manufacturados. La línea de montaje tampoco está equilibrado debido al cuello de botella que equilibra la línea, que ocurre en la línea de montaje. A causa de estos, la productividad y la eficiencia son baja y no tienen el nivel óptimo.

El objetivo del equilibrio de línea es organizar o comprometer la efectividad del trabajo, instalaciones, tipo de flujo en la línea, demanda, secuencia de tecnología y recursos; entonces, la cadena de ensamble puede ser funcional o planeado con el grado más alto de eficiencia. El método de equilibrio de línea utilizado en este estudio es para obtener el tiempo promedio de producción para la línea de ensamble del asiento del vehículo y la eficiencia de la línea de producción. Hay dos tipos de línea algoritmos de equilibrio utilizados para la línea de montaje del asiento llamados: el método de regla del candidato más largo y Técnica de Kilbridge y Wester.

Dado que las estaciones de trabajo están ocupadas por empleados, uno de los objetivos de equilibrio de línea es mantener a los empleados ocupados y disminuir el tiempo de inactividad de cada trabajador. Esto significa que para optimizar la utilización de los trabajadores o las estaciones de trabajo. Actualmente, los modelos de productos dependen de demanda del cliente La tasa de producción propuesta es 14 juegos por hora y un mínimo de trabajadores son 9.

Resultado del balanceo de línea

Las tablas 15 y 16 muestran el tiempo de ciclo y el tiempo de inactividad tiempo utilizando el método de regla más grande candidato y Kilbridge y Wester respectivamente. La segunda estación de trabajo tiene el menor tiempo de inactividad (0.01 min) mientras que la estación de trabajo novena tiene el tiempo de inactividad (1.48 min)

Tabla 15 Resultados método de la regla más grande

	Estaciones								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Tiempo Muerto (min)	0.42	0.01	0.3	0.09	0.1	0.19	0.32	0.48	1.48
Tiempo de Servicio (min)	3.74	4.15	3.86	4.07	4.06	3.97	3.84	3.68	2.68
Tiempo de Reposición (min)	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 16 Resultados método Kilbridge y Wester

	Estaciones								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Tiempo Muerto (min)	0.42	0.75	0.21	0.07	0.41	0.84	0.56	0.08	0.05
Tiempo de Servicio (min)	3.74	3.41	3.95	4.09	3.75	3.32	3.6	4.08	4.11
Tiempo de Reposición (min)	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08

Fuente: Elaboración Propia

De la tabla 16, la novena estación de trabajo tiene la velocidad mínima inactiva tiempo (0.05 min) mientras que la sexta estación de trabajo, tiene tiempo inactivo más alto (0.84 min). La variación de inactivo el tiempo usando Kilbridge y Wester es más pequeño que el método de regla del candidato más largo y esto le da una línea el equilibrio de eficiencia más alto.

La Tabla 17 muestra una comparación de fabricación de datos utilizando el método de regla del candidato más largo y el método de Kilbridge y Wester. Puede ser concluyó que el método Kilbridge y Wester dar una mejor tasa de producción y una mayor línea equilibrio.

Tabla 17 Comparación de los Métodos

Paramétros	Método de la regla de candidato más grande	Método Kilbridge y Wester
Produccción (asientos/hra)	12.91	13.01
Mejora en la Producción (%)	88.47	89.93
Eficiencia en la línea (%)	90.924	90.835
Tiempo muerto (%)	9.076	9.165
Eficiencia en el Balanceo (%)	91.14	92.03

Fuente: Elaboración Propia

Modelo de simulación

El modelo de simulación se construyó usando el Software de simulación ProModel. La simulación ha sido llevada a cabo para determinar e identificar el cuello de botella O problemas en la línea de montaje existente y se propuso una línea de ensamble equilibrada.

El software se usó para simular la línea actual de ensamble (Modelo A) y el balanceo de línea se modelo con el método Kilbridge y Wester (Modelo B)

La simulación fue utilizada para obtener la tasa de producción y la estación de trabajo, ubicación o utilización de mano de obra para comparar con la línea de ensamble existente y el equilibrio de línea de ensamble.

Algunas de las suposiciones hechas:

a) Parámetro de la estación

- i) Se consideró el 100% de eficiencia.
- ii) La estación normal realiza una operación en una sola estación y ensamble a la vez.
- iii) El campo de prioridad nos permite configurar la estación prioridad a bajo o alto. Esto se usa en conjunto con las reglas de empujar y tirar controlando el flujo de piezas a través del modelo.

b) Parámetro del inventario

- i) La prioridad del inventario se utiliza con la regla de empuje y tire para determinar el enrutamiento.
- ii) Se aplica la regla del primero en entrar- primero en salir (FIFO) en el inventario y la estación de trabajo.

Resultados de la simulación

Se hizo una comparación entre el modelo de ensamble existente (Modelo A sin balanceo de línea) y el modelo propuesto (Modelo B, con el balanceo de línea).

Los resultados se presentan en la tabla 18.

Tabla 18 Resultados de la simulación

Paramétros	Modelo A	Modelo B
Variación de la Utilización (%)	38.24	32.12
Producción (asientos/hra)	8.86	10.51
Mejora en la Producción (%)	29.44	53.47

Fuente: Elaboración Propia

El modelo A tiene 9 operarios mientras el modelo B 10 operarios. Sin embargo, el modelo B tiene mejor utilización de los recursos y producción. El operario número 3 fue eliminado del modelo B para reducir los costos. Esto con el fin de balancear la línea de producción y optimizar los tiempos de ciclo de los recursos y la secuencia de operaciones.

Cuellos de Botella e Inventario en proceso

Estudio 2

Se recomienda, antes de querer solucionar un cuello de botella, tener en cuenta el uso de la teoría de restricciones Drum- Buffer- Rope, el cual provee un conocimiento en el cual se pueden racionalizar los recursos disponibles, ya que existen. Dos tipos de inventarios que pueden utilizados para eliminar los cuellos de botella en la industria automotriz. (Krystek & Sara, 2016)

- Temporal: el cual se puede alimentar en la estación donde existe el cuello de botella y se suministra por adelantado.
- Cuantitativo: este se puede alimentar antes de que exista problema en el recurso critico

Por medio de la teoría de restricciones se pueden identificar los cuellos de botella y en base a esto se pueden definir los lotes de inventario en proceso que pueden ir antes o después de las estaciones críticas que presentan este problema.

Se recomienda validar por medio de la simulación de eventos discretos, si con estos cambios es posible eliminar y eficientizar los procesos productivos y aumentar la cantidad de productos terminados.

2.2.9 Tiempos de Paro

Definición

Gómez (1998) define los tiempos muertos como todo aquellos que no son invertidos directamente en la reparación, como son: paros de trabajo, tareas burocráticas y tiempos de espera por ausencia de personal, por falta de los útiles o herramientas o por carecer de los recambios necesarios. Así mismo manifiesta que es importante conocer algunos de estos tiempos muertos, ya que si se comprueban que son elevados, o inclusive si se llegaron a superar sistemáticamente a los tiempos de reparación, debería pensarse en la existencia de un fallo del soporte logístico, La suma del TIR (Tiempos Invertidos en Reparación) y de los tiempos muertos será el tiempo total durante el cual el ítem en estudio está averiado. Este tiempo se suele denotar como TA (Tiempo de Avería), y al valor medio de estos tiempos se le denomina Media de los Tiempos de Avería, lo que se indica por MTA.

El tiempo de paro es definido como la cantidad de tiempo que puede transcurrir entre el inicio de una actividad A1 y que inicial en una actividad A2, siempre y cuando A1 preceda de A2. (Focacci, Laborie, & Nuijten, 2000)

El problema de la secuenciación de operaciones de un proceso productivo, es un problema ampliamente investigado en la literatura con diferentes enfoques. Uno de los objetivos más comunes es minimizar el tiempo de reconfiguración entre dos operaciones sucesivas. (Artigues, Belmokhtar, & Feillet, 2003).

La definición que se utilizara para el tiempo de paro será la de (Focacci, Laborie, & Nuijten, 2000), ya que es una de las definiciones más nuevas que se encontró para el tiempo de paro y en los estudios que hizo menciona la relación entre la variable tiempo de paro y secuenciación.

Estudio 1

El método que se considera para solución del problema de la secuenciación con el set up, es primero generar un modelo matemático.

Donde se considera un conjunto $J = \{J_1, \dots, J_n\}$ de n trabajos. Los trabajos deben ser procesados en conjunto $M = \{M_1, \dots, M_m\}$ con m recursos (máquinas). Cada trabajo se compone de m operaciones O_{i1}, \dots, O_{im} , para ser procesados en este orden, sin superposición o derecho preferente de compra. El conjunto de todas las operaciones se anota O y su tamaño es $N = n \times m$.

La operación $O_{ij} \in O$ requiere máquina $m_{ij} \in M$ y requiere tiempo de procesamiento $p_{ij} \geq 0$. Las máquinas admiten al menos una operación a la vez.

Un conjunto de tipos de tiempo de paro se definen α , con una matriz $(|\alpha| + 1) \times (|\alpha|)$ de tiempos de paro observados. A cada operación O_{ij} está asociado el tipo de paro $\alpha_{ij} \in \alpha$. Una configuración tiempo $s_{ij\sigma_{kl}}$ es entonces necesario entre dos operaciones consecutivas O_{ij} y O_{kl} en la misma máquina. También, una configuración inicial $s_{0\sigma_{ij}}$ veces es necesario si O_{ij} es el primera operación en máquina m_{ij} . Finalmente, asumimos que los tiempos de preparación satisfacen la desigualdad triangular.

En base a lo anterior el objetivo es minimizar el tiempo de finalización de la última operación procesada.

Generado el siguiente modelo figura 15:

Figura 15 Modelo de Setup

$$\begin{aligned}
 & \text{minimize } C_{max} & (1) \\
 \text{subject to} & \\
 & C_{max} \geq S_{im} + p_{im} \quad (i = 1, \dots, n) & (2) \\
 & S_{ij} + p_{ij} \leq S_{i(j+1)} \quad (O_{ij} \in O; j < m) & (3) \\
 & (S_{ij} \geq S_{hl} + p_{hl} + s_{\sigma_{hl}\sigma_{ij}}) \text{ or} & \\
 & (S_{hl} \geq S_{ij} + p_{ij} + s_{\sigma_{ij}\sigma_{hl}}) \quad (O_{ij}, O_{hl} \in O; m_{ij} = m_{hl}) & (4) \\
 & S_{ij} \geq S_{0\sigma_{ij}} \quad (O_{ij} \in O) & (5) \\
 & S_{ij} \in \mathbb{N} \quad (O_{ij} \in O) & (6) \\
 & C_{max} \in \mathbb{N} & (7)
 \end{aligned}$$

Fuente: Artigues et al (2003)

Donde:

- (1) Es la función objetivo donde se minimiza el tiempo de finalización de la última operación procesada.
- (2) Indica el tiempo de paro de las soluciones optimas
- (3) Representa las restricciones de precedencia entre las sucesivas operaciones de un mismo trabajo.
- (4) El tiempo de paro entre las operaciones de una misma máquina aparecen en estas restricciones.
- (5) Los tiempos de paro iniciales.

Para posteriormente utilizar el método branch and bound, el cual se basa en un esquema de ramificación, la cual corresponde elegir una dirección de un arco disyuntivo, hasta que se obtenga la selección completa. En donde la ramificación se basa en una las maquinas aleatoriamente en el conjunto de sus operaciones que se asignan a esta máquina. Cada nodo del árbol proporciona una selección parcial, donde la dirección de cada arco disyuntivo es emitida. Las operaciones son tomadas en el orden creciente de las horas de inicio de la producción.

Para posteriormente los datos obtenidos del algoritmo son simulados en un programa con código CC+ y ILOG solver 5.2, para ir simulando las restricciones utilizadas en método branch and bound. (Artigues, Belmokhtar, & Feillet, 2003).

Estudio 2

En un estudio realizado por (Focacci, Laborie, & Nuijten, 2000), muestran un problema de secuenciación de la producción con tiempos de paro que se alternan con las actividades que realizan.

Consideran dos criterios de función objetivo la diferencial de tiempo entre el inicio y el final de una secuencia de trabajos o tareas (makespan) y la suma de los tiempos

de paro (setup), mencionan que en el mundo real han encontrado que para poder tener un buen programa de producción secuenciado es necesario minimizar estos dos.

Se escogió el método de restricciones con programación (CP), donde se propone en dos fases resolver el problema de programación con secuenciación. En la primera fase es necesario encontrar una buena solución para reducir el makespan y en la segunda fase es minimizar la suma de los tiempos de paro mientras se mantienen el tiempo máximo del makespan que se encontró en la primera etapa.

Como definición del problema se planteó lo siguiente, un conjunto de n actividades A_1, \dots, A_n y un conjunto de m recursos con capacidad de uno R_1, \dots, R_m . Cada actividad A_i es procesada con un recurso R_j por p_{ij} unidades de tiempo. Los recursos R_j pueden tener otras actividades de m recursos. La secuencia depende de los tiempos muertos y la cantidad de actividades. Con una matriz de los tiempos de setup S_{kj} , donde s_{ij} representa el tiempo muerto entre las actividades A_i y A_j las cuales son secuenciadas para el mismo recurso R_k . En muchos casos el tiempo de inicio $j \geq \text{fin}_i + S_{ij}$. Puede haber un tiempo de setup s_{ij} antes de la primera actividad de A_j que puede iniciar con el recurso R_k y los tiempos de desmontaje t_{di} después de la última actividad A_i que termina con el recurso R_k . Las actividades pueden ser ligadas con las relaciones precedentes $A_i \rightarrow A_j$. En este caso la actividad A_j no puede iniciar antes de la A_i , las restricciones del problema se definieron en función de la capacidad de los recursos, los tiempos de traslado, las relaciones temporales y los tiempos de las actividades. El principal objetivo es encontrar la mejor combinación del programa de producción en función del makespan y minimizando la suma de los tiempos muertos.

Como solución inicial se definió un modelo usando ILOG Scheduler. Donde cada actividad A_i es representada por dos variables las cuales son los tiempos de inicio i y los tiempos finales i estas dos variables son definidas por la relación $\text{fin}_i - \text{inicio}_i = p_i$. Donde cada conjunto de recursos alternativos M_k es dado. Cada actividad A_i es procesada por una alternativa del recurso M_k . Esto significa que cada actividad

debe ser ejecuta por un recurso R_k . Lo tiempos de paro son procesados en un modelo mediante un matriz asociada con cada recurso R_k .

Se consideraron en lo modelo las restricciones de secuenciación, tiempos de paro y la disponibilidad de los recursos.

Los resultados que se obtuvieron al simular el modelo matemático y sus restricciones se redujeron considerablemente los tiempos muertos tabla 19.

Tabla 19 Resultados de la simulación

Tiempos de Paro (min)				
Modelo	1er Corrida	2da Corrida	3era Corrida	Optimización
T2-PS12	1710	1640	1640	1530
T2-PS13	1930	1640	1640	1430
TS-PSS12	1480	1300	1300	1220
TS-PSS13	1290	1220	1140	1220

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 19 se puede ver como de las 3 corridas que se hicieron el modelo se fueron optimizan los tiempos de paro, en la columna de optimización se muestra como con la optimización del modelo se redujo considerablemente los tiempos de paro.

Estudio 3

Lo que se quiere desarrollar con este estudio principalmente es como con un software de simulación se puede tener flexibilidad con los tiempos de paro de una línea de producción automotriz. Los parámetros de secuenciación, número de tarimas y máquinas son medidos con esta simulación (Rybicka, Ashutosh, & Shane, 2016).

Se simularon 44 estaciones de trabajo se muestra su tiempo de ciclo de cada una figura 16.

Figura 16 Estaciones de trabajo y tiempo de ciclo

Stage	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Location	L1	F5	M1	F5	L2	L1	F5	M1	F5	L2	L1	F5	M1	F5	M4
Cycle time	1	0.1	35.0	0.1	0.6	0.7	0.1	55.0	0.1	0.6	1.0	0.1	25.0	0.1	0.1
Stage	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Location	M3	M4	F5	L2	M1	M6	M12	L1	F5	M1	F5	M4	M3	M4	F5
Cycle time	4.0	0.1	0.1	0.8	5.0	5.0	2.0	0.9	0.1	70.0	0.1	0.1	4.0	0.1	0.1
Stage	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	
Location	L2	M14	M13	L1	F5	M2	F5	M4	M3	M4	F5	L2	I	SHIP	
Cycle time	0.7	5.0	5.0	0.8	0.1	35.0	0.1	0.1	4.0	0.1	0.1	1.0	1.0	0	

Fuente: Rybicka et al (2016)

Los parámetros de secuencia (S1, S2) se refiera al cambio de programa de producción, la secuencia S2 tiene 75 minutos adicionales de S1. El número de tarimas parámetros (N2, N3, N4) teniendo un rango de 2 a 4 tarimas. El número de máquinas (M3 y M4) se refiere a las capacidades de las máquinas. M4 tiene cuatro máquinas disponibles y M3 tiene tres. Se consideraron tiempos de paro para las máquina. Los parámetros del modelo se resumen en la figura 17:

Figura 17 Paramétros

Scenario No.	Parameters		
	Sequence (S)	Number of pallets (N)	Number of machines (M)
Base Case	1	3	4
1	2	3	4
2	1	2	4
3	2	2	4
4	1	4	4
5	2	4	4
6	1	3	3
7	2	3	3
8	1	2	3
9	2	2	3
10	1	4	3
11	2	4	3

Fuente: Rybicka et al (2016)

Resultados de la simulación

El número óptimo de tarimas en el sistema es tres, ya que si se utilizan cuatro, se genera inventario en proceso y por lo tanto cuellos de botella.

El número óptimo de máquinas disponibles debe ser cuatro, ya que genera un mayor producto terminado 1350 piezas, que con tres máquinas solo se logran 1190 piezas, así como también la utilización de las máquinas es el óptimo casi un 80% entre las cuatro.

La simulación ayudo a poder encontrar la solución óptima considerando los tiempos de paro, tarimas y el uso de más máquinas con sus respectivos tiempos de paro.

2.2.10 Generación de Desperdicios (Retrabajos)

Definición

El ex presidente de Toyota, Fujio Cho define desperdicio como “cualquier cosa que no sea la cantidad mínima de equipo, materiales, piezas, horas de trabajo absolutamente esencial para la producción”. Cualquier cantidad que exceda el mínimo requerido se considera un desperdicio, porque se invierte esfuerzo y material en algo que no es necesario en ese momento (Chase, Jacobs, & Aquilano, 2010).

Es todo aquello que no agrega valor a un producto o servicio para los clientes. (Giannasi, 2012).

(Nakata, 2014), Es la merma (perdida normal) que sufre el material durante su transformación. El desperdicio está considerado dentro del costo de producción; por lo tanto, su valor lo absorbe dicho costo, no tiene valor alguno aparente y en caso de que sea vendido, el valor de su producto se puede solucionar como:

- Recuperación del costo
- Aprovechamiento diverso

La definición que se usara en la de (Chase, Jacobs, & Aquilano, 2010), ya que como lo menciona la definición se quiere detectar y eliminar todas aquellas actividades productivas que no son necesarias, ya sean materiales, actividades, etc. Y menciona otro de los indicadores que se desea medir los costos que estas actividades generan y que restan valor.

El objetivo de este trabajo es analizar el impacto del uso de la simulación virtual en el Producto Proceso de desarrollo (PDP). Se realizó un análisis comparativo entre PDP "Tradicional Modelo", (un nombre usado específicamente en este trabajo para el desarrollo de productos sin herramientas virtuales); y el PDP actualizado (proceso que usa simulación virtual para analizar el proyecto antes acumulación y prueba de prototipos). El enfoque de la metodología de investigación fue el estudio de caso utilizado en el sector automotriz. Los análisis se llevaron a cabo en base a documentos e investigaciones de datos con profesionales involucrados en actividades de PDP y simulación virtual. La investigación de datos se realizó usando dos cuestionarios estructurales; entrevistas con directores y gerentes de Ingeniería de producto. Según el estudio teórico y los resultados del estudio de caso las preguntas propuestas fueron respondidas, discutiendo las ventajas y restricciones de las herramientas virtuales. (Mongelli & Monteiro de Carvalho, 2006)

El análisis documental se basó en las pruebas físicas de los informes, informe de prueba de simulación, estándares legales, procedimientos y metodologías de simulación.

Los documentos mencionados permitieron la comparación entre simulación virtual y pruebas físicas, haciendo posible el análisis de capacidad y capacidad de simulación.

La Tabla 20 muestran; la diferencia entre la simulación virtual y la prueba física, se muestra por porcentaje.

La Tabla 20 muestra que la herramienta de simulación virtual se puede aplicar a varias pruebas y hay diferentes niveles de capacidad y confianza de la simulación.

Tabla 20 Diferencia entre simulación y prototipo

Prueba	Diferencia entre simulación y prototipo físico
Aplastamiento del techo	<10%
Choque laterla	<15%
Temperatur Corporal	<10%
Consumo de Agua	Análisis Cualitativo
Rigidez	<5%

Fuente: Elaboración Propia

La prueba de simulación relacionada con la ingesta de agua se realiza por análisis cualitativo que muestra el flujo de agua en la región de la admisión de aire.

La prueba de temperatura corporal inferior depende de la condición física, datos del prototipo, como la temperatura de escape, por lo que solo con esta información es posible generar buenos resultados en simulación virtual. En consecuencia, para esta prueba específica, la simulación no elimina el prototipo físico, pero puede reducir los ciclos de evaluación física.

Las pruebas de simulación de rigidez y aplastamiento de techo representan buena precisión el procedimiento de prueba física que permite más sustitución de prototipos físicos.

Análisis de entrevistas

Los datos recopilados de las entrevistas permitieron identificación de las limitaciones de simulación del prototipo físico sustitución, así como los beneficios que se pueden lograr aplicando simulación virtual.

Como ya se mencionó, el primer paso fue el enfoque entrevista con los gerentes de simulación. Los datos quedaron claros la reducción en costo y tiempo para todas las pruebas seleccionadas cuando simulación en lugar de prototipo físico se aplicó.

El segundo paso de la investigación de campo fue el cuestionario 2, en el que las preguntas relacionadas con los beneficios y las dificultades del uso de la simulación

se aplicaron a los gerentes y directores de Ingeniería de producto. La figura 3 muestra el grado de acuerdo de beneficios de simulación virtual basados en profesionales NPD

La gráfica 5 muestra que más del 70% de los entrevistados de acuerdo con todos los beneficios de simulación enumerados, por ejemplo, reducción en costo y tiempo, mejor calidad, problema anterior identificado y mejor trabajo simultáneo.

De acuerdo con esta entrada, es posible concluir que la unidad de análisis conoce los beneficios de la simulación y es una postura positiva relacionada con el uso de simulación en el proyecto desarrollo y validación

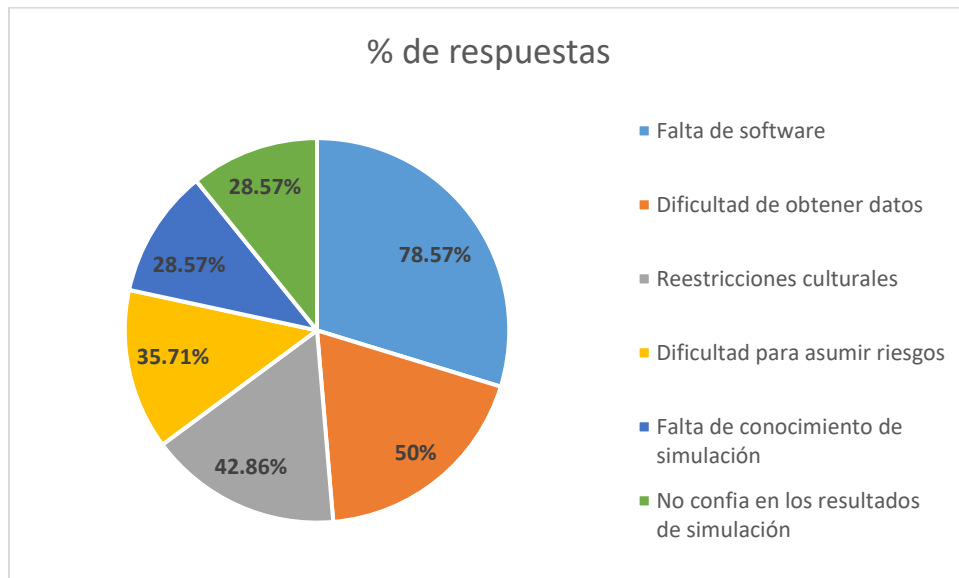
El cuestionario II permitió obtener datos relacionados con dificultades y limitaciones de aplicar la simulación basada en percepción de los profesionales, como se muestra en la gráfica 5.

La investigación de campo realizada por el cuestionario II indicó que "Falta el software y falta física y virtual" fue el factor de restricción más votado para uso efectivo de la simulación como sustitución del prototipo físico herramienta. Este resultado está de acuerdo con el resultado del cuestionario I, donde se detectó que pruebas específicas como el colapso lateral y la ingesta de agua tienen las siguientes restricciones de simulación: restricción del modelo de simulación y software faltante.

El ítem "Dificultad para obtener datos" fue clasificado por 50% de los entrevistados como factor de restricción; este resultado es también de acuerdo con los resultados del cuestionario I, donde la dificultad de recopilación de datos se identificó para el siguiente prueba: temperatura corporal.

El tercer artículo más votado por los profesionales de NPD fue restricciones culturales, el hábito de desarrollar y validar productos por prototipos físicos impidieron la migración a uso de simulación virtual.

Gráfica 5 Resultados de las Encuestas



Fuente: Elaboración Propia

2.3 Hipótesis Operativas o Específicas

Las variables del proceso de ensamble que optimizan la secuenciación de la producción de componentes en la industria automotriz de camiones pesados y que pueden integrarse en un modelo son: Capacidad Instalada, Inventario en Proceso, Tamaño de Lote, Takt Time, Mezcla de Productos, Tiempo de Ciclo, Tiempos de Operación, Cuellos de Botella, Tiempos de Paro, Generación de Desperdicios.

Las hipótesis de este estudio serán:

X1 La Capacidad Instalada es una variable del proceso de ensamble que tiene un impacto positivo en la optimización de la secuenciación de la producción de componentes automotrices.

X2 La Inventario en Proceso es una variable del proceso de ensamble que tiene un impacto positivo en la optimización de la secuenciación de la producción de componentes automotrices.

X3 Tamaño de Lote es una variable del proceso de ensamble que tiene un impacto positivo en la optimización de la secuenciación de la producción de componentes automotrices.

X4 La Takt Time es una variable del proceso de ensamble que tiene un impacto positivo en la optimización de la secuenciación de la producción de componentes automotrices.

X5 Mezcla de Productos es una variable del proceso de ensamble que tiene un impacto positivo en la optimización de la secuenciación de la producción de componentes automotrices.

X6 La Tiempo de Ciclo es una variable del proceso de ensamble que tiene un impacto negativo en la optimización de la secuenciación de la producción de componentes automotrices.

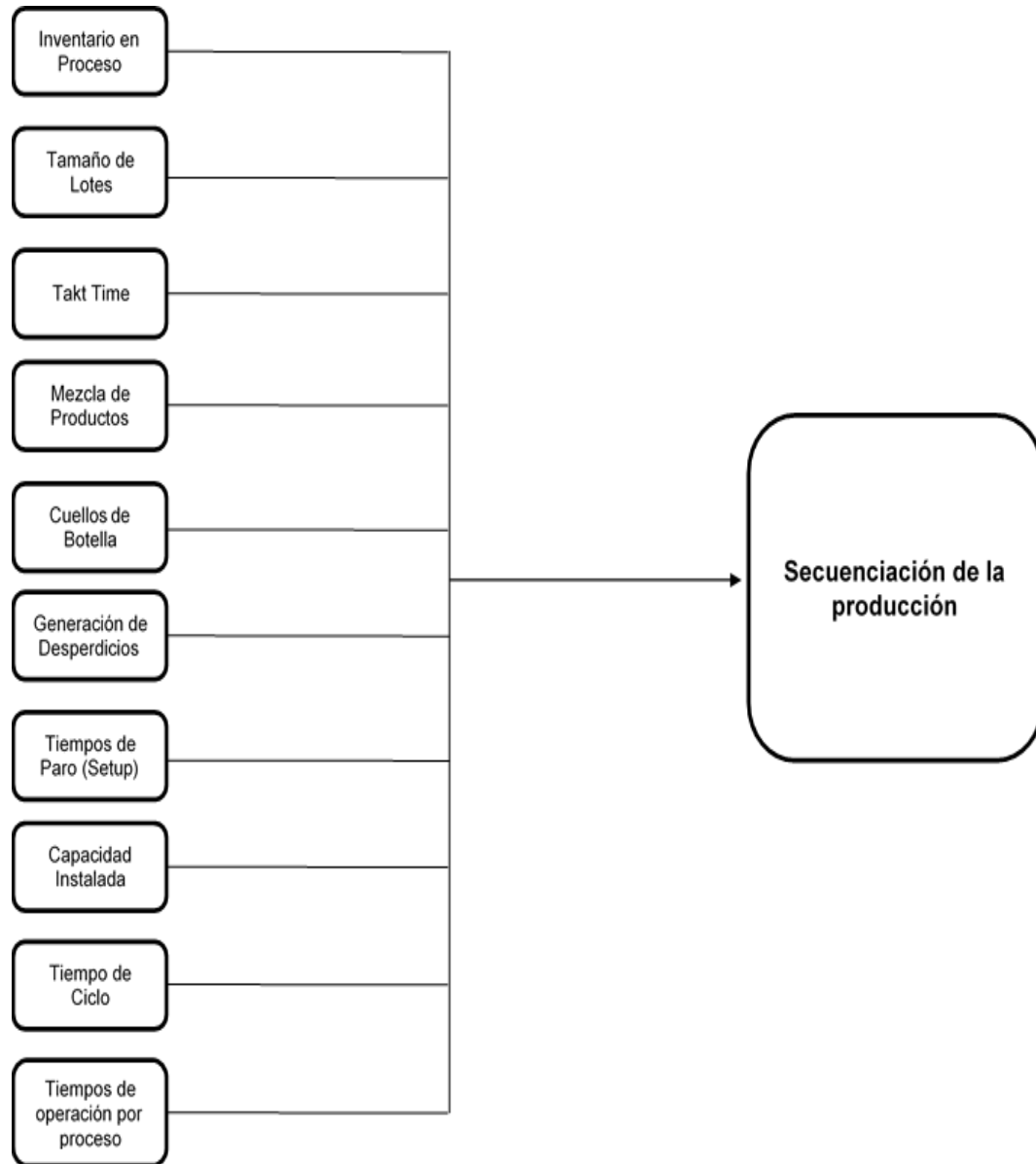
X7 La Tiempos de Operación es una variable del proceso de ensamble que tiene un impacto positivo en la optimización de la secuenciación de la producción de componentes automotrices.

X8 La Cuellos de Botella es una variable del proceso de ensamble que tiene un impacto negativo en la optimización de la secuenciación de la producción de componentes automotrices.

X9 La Tiempos de Paro es una variable del proceso de ensamble que tiene un impacto negativo en la optimización de la secuenciación de la producción de componentes automotrices.

X10 La Generación de Desperdicios es una variable del proceso de ensamble que tiene un impacto negativo en la optimización de la secuenciación de la producción de componentes automotrices.

2.3.1 Modelo gráfico de la hipótesis



Fuente: Elaboración Propia

Modelo esquemático de la hipótesis

$$Y = f(X1, X2, X3, X4, X5, X6, X7, X8, X9, X10)$$

2.3.2 Modelo de Relaciones teóricas con las hipótesis

Referencia	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	Y
Aguirre, A., Müller, E., & Sebastian, S. (2008)		x									x
Altemdorfer, K., Felberbauer, T., Gruber, D., & Hübl, A. (2013)											x
Arigues, C., Belmokhtar, S., & Feillet, D. (2004)							x				x
Artigues, C., Belmokhtar, S., & Feillet, D. (2003)							x				x
Artingues, C., & Feillet, D. (2007)											x
Barra, M. J., & Ferreira, A. (2007)			x								x
Bautista, J., & Fortuny-Santos, J. (2012)											x
Bergen, M., Van Beek, P., & T., C. (2001)											x
Brucker, P., Jurish, B., & Sievers, B. (1994)											x
Burbano Arias, J. F. (2011)		x									x
Carro Paz, R., & González Gómez, D. (2004)		x						x	x	x	x
Chase, R. B., Jacobs, F., & Aquilano, N. (2010)			x			x					x
Cheng, J., Lu, Y., & Puskorius. (1999)											x
Corichi, G. A., & Cerón, I. A. (2000)				x							x
Cusumano, M. (1989)											x
De la Garza, E. (15 de 11 de 1994)											x
Detty, R. B., & C., Y. J. (2000)											x
Ding, F., & H, S. (2004)											x
Dosi, A. (1988)											x
Drexler, A., & Kimms, A. (2001)				x							x
Drexler, A., & Kimms, A. (2006)		x									x
Duannmu, J., & Taaffe, K. (2007)	x		x		x	x				x	x
Eppen, G., Gould, F., Schmidt, Moore, J., & Watherford, L. (2000)											x
Fernandez-Baños Marín, I. (Diciembre de 2003)											x
Focacci, F., Laborie, P., & Nuijten, W. (2000)							x				x
Freyssenet, M., & Boyer, R. (2003)											x
Gadinaik, Y., & Bilollikar, S. (2014)					x			x			x
Giannasi, E. (2012)											x
González Vicente, A. F. (2003)	x										x
Gottlieb, J., Puchta, M., & C., S. (2003)											x
Gravel, M., C., G., & W.L., P. (2005)											x
Hariri, A., & Potts, C. (1991)											x
Hoeve, V. (2006)											x
Holland. (1975)											x
I.P., G., & T., W. (1999)											x
Islamoglu, E. N., Ryu, K., & Ilkyeong, M. (2014)											x

Ismail, N., Tai, S., & Leman, Z. (2002)					x						x
Referencia	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	Y
Jara, L. (3 de Noviembre de 2015)								x			x
Jararaman, A., & Ali, G. (1997)		x								x	x
Jayaraman, A., & Gunal, K. A. (1997)											x
Joly, A., & Frein, Y. (2008)											x
Käfer, R. (2007)											x
Khalil-El, R. (2015)											x
Krajewski, L., L., R., & M., M. (2011)	x				x						x
Krystek, J., & Sara, A. (2016)	x				x						x
Lee, J. (1998)											x
Lorenc, A., & Szkoda, M. (2016)											x
Mastrolilli, M., & Gambardella, L. (1998)				x							x
Meissner, S. (2010)											x
Mejía, C. C. (3 de Julio de 2013)								x			x
Merwe, V. d. (Octubre de 2010)											x
Miller, S., & Dennis, P. (2000)											x
Mongelli, M. A., & Monteiro de Carvalhho, M. (2006)						x					x
Mucientes, M., Vida, J., Bugarin, A., & Manuel, L. (2008)										x	x
Nakata, S. (2014)						x					x
Ohno, T. (1988)											x
Omkumar, M., & Shahabudden, P. (2006)											x
Onur, Ü. M., & Upendram, S. S. (1994)											x
Parello, B., Kabat, W., & L., W. (1986)								x	x	x	x
Pedro, S. M., & Echávarri Yepes, R. (2009)	x										x
Pereira, R. (16 de Diciembre de 2016)			x						x	x	x
Perron, L., & Shaw, P. (2004)											x
Phani, K., Kamala, V., & ACS., K. (2013)									x	x	x
Pineda, M. (11 de 01 de 2017)											x
Puchta, M., & Gottlieb, J. (2002)											x
Quingsong, L., & QU, D. (2009)									x	x	x
Regin, J., & J.F., P. (1997)											x
Rybicka, J., Ashutosh, T., & Shane, E. (2016)							x		x	x	x
SELECTED, T. R. (2016)	x										x
Smith, B. (1996)											x
Solnon, C. (2000)											x
Solnon, C., & Dat Cung Van, N. A. (2005)											x
Solnon, C., Dat Cung, V., Nguyen, A., & Artigues, C. (2005)											x
Sun, L., Cheng, X., & Liang, Y. (2010)											x
Thun, J.-H., Marble, R. P., & Silveira-Camargos, V. (2007)											x

Tiacci, L., & Saetta, S. (2007)				x								x
Trakultogchai, A., Supsomboon, S., & Limtanyakul. (2013)					x				x	x		x
Referencia	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	Y	
Tsang, E. (1993)												x
Ülgen, O. M., & Upendram, S. S. (1995)					x			x				x
Ulgen, O., & Ali, G. (1989)					x			x				x
Ulgen, O., & Ali, G. (1998)					x			x				x
Vajasuvimon, A., & Supsomboon, S. (2014)								x	x	x		x
Valero, H. M., Garcia, S. J., Coronado, R., & Hernandez, J. (2011)				x								x
Van der Merwe, S. (2010)												x
Vicencio, M. A. (Abril de 2007)												x
Wagner, M. S., & Victor, S.-C. (2012)												x
Warwick, T., & Tsang, E. (1995)												x
Wirabhuaana, A., Haron, H., & M., R. (2008)					x				x	x		x

Fuente: Elaboración Propia

CAPITULO 3. ESTRATEGIA METODOLÓGICA

En el presente capítulo se explicara el tipo de investigación que se utilizó para el desarrollo de la simulación, los datos de entrada para el modelo, el tamaño de muestra que se utilizó y el sujeto de estudio que se consideró. Así como también se explica la técnica de regresión multivariable que se utilizara el análisis de obtenidos de la simulación.

3.1 Tipo y Diseño de la Investigación

Hoy en día es más frecuente encontrar empresas micro, pequeña o mediana, en todos los sectores económicos. En su afán por surgir estas empresas se esfuerzan por cumplirles a sus clientes de diversas maneras pero sin llevar a cabo procesos de planeación (Zapata Guerrero, 2005), no desarrollan una estrategia de negocio (Palomo González, 2005) y en su mayoría no utilizan herramientas técnicas, lo que las lleva a sobrecostos y por lo tanto a improductividades.

De otra forma, en las empresas se presentan situaciones o sucesos que requieren tomar decisiones para planificar, predecir, invertir, proyectar, etc. Para eso es importante el conocimiento del problema o de la situación y de las posibles soluciones, donde juegan un papel de importancia herramientas que permiten la obtención y análisis de información, como la modelización y la simulación. (Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Buenos Aires, 2010) y que sirve como soporte para la toma de decisiones, la cual ha sido empleada en diversas áreas, con especial énfasis en sistemas de manufactura (Dong, 2001).

Por otro lado, los empresarios confían con más facilidad en modelos que simulen la realidad contruidos a partir de parámetros y formulas fácilmente identificables dentro del sistema real, que en modelos matemáticos que pueden ofrecer la misma

o mejor calidad en las conclusiones, pero que resultan más complicados de entender y necesitan de un conocimiento previo en la materia (Mejía Ávila & Galofre Vásquez, 2008).

Por lo tanto, se pretende desarrollar un estudio de simulación de procesos productivos como herramienta cuantitativa, específicamente en el análisis de las etapas previas al diseño del modelo de simulación. Debido a la dificultad de identificar la complejidad del sistema a simular y de las restricciones en la recolección de información (Trujillo Díaz, Vallejo Cubillos, & Becerra Fernández, 2010) y de su análisis estadístico para el posterior diseño del modelo, lo hace más complejo por el nivel de detalle que se quiere incluir en el análisis, además de la incertidumbre de los datos y el número de criterios que se utilizan en la comparación de alternativas (Otamendi, 2002).

3.1.1 Tipos de Investigación

Las variables de esta investigación son cuantitativas, como se demostró en el capítulo 2, estas variables se pueden medir y son valores numéricos por lo que se puede experimentar con ellos con el fin de encontrar el valor óptimo.

Ya que es un estudio con variables cuantitativas, reúne los siguientes elementos:

- 1) **Descriptivo:** No es descriptivo, ya que por la naturaleza del problema, no es posible aplicar una encuesta que pueda describir los elementos de las variables independientes, así como también su impacto en la variable dependiente.
- 2) **Correlacional:** En esta investigación se desea conocer la correlación positiva o negativa que tienen las variables independientes con la dependiente, así como también las relaciones que puede haber entre estas

y como impactan unas variables más que otras y sus posibles combinaciones.

- 3) **Explicativo:** Lo que se desea explicar es la causa-efecto de las variables independientes sobre la dependiente, así como también si estas muestran relación entre ellas y como afectan a la dependiente.

3.1.2 Diseño de la Investigación

El diseño de la investigación será experimental, ya que se va analizar si una o más variables independientes afectan a la variable dependiente, por medio de la manipulación intencional. Ya que a las variables se pueden cuantificar con valores numéricos, por lo que se puede experimentar con ellos con el fin de encontrar el valor óptimo.

De acuerdo a la clasificación de (Cambell et al. 1966), dividen los diseños experimentales en 3 categorías: pre experimentos, experimentos “puros” y cuasi experimentos. Esta investigación será un experimento “puro”, ya que de acuerdo a la definición que presenta se reúne los siguientes requisitos para lograr el control y la validez interna:

- 1) Grupos de comparación (manipulación de la variable independiente)
- 2) Equivalencia de los grupos.

Por la naturaleza de esta investigación y con el fin de no afectar el sistema real por medio de la experimentación, se va a simular un proceso productivo de ensamble de camiones pesados y se va a explicar cómo las variables independientes afectan sobre la dependiente. Se va a desarrollar primero un modelo de simulación por computadora del proceso de ensamble de camiones pesados.

Para llevar a cabo el modelo se seguirán las siguientes actividades como parte del diseño del experimento (Barton, 2010).

1. Definición de las hipótesis a ser evaluadas.
2. Desarrollo del experimento para probar las hipótesis.
 - a) Definir los objetivos del experimento.
 - b) Identificar y clasificar las variables independientes y dependientes.
 - c) Elegir un modelo de probabilidad para el comportamiento del modelo de simulación.
 - d) Elegir un diseño de experimento.
 - e) Validar las propiedades del diseño elegido.
3. Llevar a cabo el experimento.
4. Analizar los datos del experimento.
5. Llevar a cabo la optimización

Para el desarrollo del modelo se utilizara el software promodel

Promodel (Production Modeler), desarrollado por Promodel Corporation, es una herramienta de simulación con animación y optimización, que permite modelar sistemas de manufactura y servicios.

Promodel es una herramienta poderosa que permite a los ingenieros y administradores probar varias alternativas de diseño, ideas y procesos antes de su implementación.

Los datos de salida que arroja el simulador promodel se centran en la utilización de los recursos, capacidad de la producción, productividad, niveles de inventario, cuellos de botella, tiempo de proceso, entre otros indicadores que pueden ser calculados.

ProModel es un paquete de simulación que no requiere programación, aunque si lo permite. Corre en Windows y no requiere hardware especializado. (Harrell, Ghosh, & Bowden, 2004).

3.2 Métodos de Recolección de Datos

3.2.1 Funcionamiento del Modelo estadístico PROMODEL

Para el desarrollo del modelo se utilizara el software Promodel (Production Modeler) el cual cuenta con una tecnología de simulación de eventos discretos a computadora el cual es utilizado para planificar, diseñar y mejorar los sistemas de fabricación, logística y de servicios nuevos o existentes. El cual permite representar con precisión los procesos del mundo real, incluyendo la variabilidad e interdependencias, con el fin de llevar a cabo un análisis predictivos sobre los cambios potenciales de las organizaciones. Ayudando a optimizar los procesos y los indicadores claves

Promodel, es un software de simulación de gran flexibilidad, especializado en evaluar procesos de producción. Permite modelar cualquier tipo de proceso. Ofrece las facilidades necesarias para que las empresas modernicen y agilice sus procesos de evaluación o planes pilotos. Sobre todo, Su amigable ambiente gráfico permite a un usuario construir modelos y escenarios sin necesidad de conocimientos específicos de lenguajes de programación, ni de modelamiento matemático. Para el tratamiento inicial de ajuste de curva de datos a distribuciones de probabilidades posee un módulo propio llamado Stat:Fit.

También, dentro de un modelo construido podemos realizar optimización mediante FED (Factorial Experiments Design). Es decir con el software Simrunner, módulo de Promodel, podemos indicar para un modelo dado ciertas condiciones de configuración. Es decir indicamos las variables que pueden tener distintos parámetros de entrada. A su vez, las variables de importancia que quisiéramos minimizar o maximizar con su respectiva ponderación, vale decir nuestra función objetivo. Finalmente, todo esto va a generar distintas corridas de escenarios automáticos de What-If, que Simrunner optimizara de acuerdo a la función objetivo ingresada.

Promodel es una herramienta software basado en simulación para evaluación, planeación y/o rediseño de Sistemas de Producción, Logísticos y de Servicios. Sobre todo, permite a los usuarios construir una representación, en computadora, de sus sistemas y evaluarlos en una variedad de escenarios. Además, la Animación y Reporte Gráfico de Salidas, con información estadística, muestra la conducta de un sistema bajo cualquier conjunto de parámetros operacionales.

Para esta investigación los pasos a seguir fueron:

1. Generar el modelo de simulación por computadora
2. Analizar los datos de las estaciones de trabajo por medio del Stat:Fit
3. Calcular el número de réplicas en base a las variables de estudio
4. Generar los datos en función de las réplicas y combinaciones.
5. Analizar los resultados obtenidos.
6. Generar los modelos.

En los estudios revisados en el marco teórico del capítulo 2, la mayoría de los artículos usan la herramienta de la simulación para predecir y mejorar el rendimiento de un sistema o establecer las relaciones entre varios elementos del sistema.

Para poder llevar a cabo un mejor análisis y mejorar el rendimiento de un sistema es por medio de la optimización, la cual ayuda asegurar que las soluciones que se implementen están cerca de los valores óptimos.

Una vez obtenido los datos de salida del simulador promodel se procederá a utilizar la herramienta SimRunner para su optimización.

SimRunner, es una herramienta de apoyo para la toma de decisiones y la optimización de los procesos simulados en Promodel, ejecuta sofisticados algoritmos de optimización en el modelo, optimizando a su vez los múltiples factores del modelo simultáneamente.

Cada proyecto de optimización requiere un modelo validado, una función objetivo y un grupo de factores que puede ser modificado para mejorar el sistema.

(Amaran, 2016) Un problema general de optimización por medio de la simulación puede ser representado de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \min E\omega[f(x, y, \omega)] \\ \text{s.t. } E\omega[g(x, y, \omega)] \leq 0 \\ h(x, y) \leq 0 \\ x_l \leq x \leq x_u \\ x \in R^n, y \in D^m. \end{aligned}$$

La función f puede evaluarse a través de la simulación para una instancia particular de entradas continuas en x y entradas discretas en y , con las variables aleatorias que se utilización en la simulación.

El vector ω puede o no ser una función de las entradas x y y . Del mismo modo, las restricciones definidas por la función del valor vectorial g también se evalúan con cada simulación que se ejecuta. En esta fórmula, se usan los valores esperados para estas funciones estocásticas. Pueden ser otras restricciones (representadas por h) que no involucren las variables aleatorias como las variables de decisión.

La mayoría de los algoritmos se centran en problemas que tienen opciones discretas o decisiones continuas, son pocos los algoritmos que abordan ambas simultáneamente.

Además, las variables discretas pueden ser binarias, ordenadas por números enteros o categóricos y se encuentran en un espacio discreto D .

Como puede verse, la formulación anterior es extremadamente general.

Otra suposición común es que f es una función de valor real y g es un vector real valorado

SimRunner usa los algoritmos genéticos con sus estrategias evolutivas, para el diseño específico de este software se basaron en los trabajos del Dr. Royce Bowden y otros expertos. (Promodel Corporation, 2010).

Los algoritmos genéticos usan el concepto de mutación y selección. En general, un algoritmo genético funciona creando una población de cadenas y cada una de estas es llamada cromosomas, las cuales básicamente son un vector de punto en el espacio de búsqueda. Los nuevos cromosomas se crean mediante el uso de funciones de selección, mutación y cruzamiento. El proceso de selección se guía mediante su forma (o valor objetivo) cada cromosoma y su selección va de acuerdo a su valor generado (utilizando métodos tales como el mapeo de la rueda la fortuna). Luego se generan cromosomas adicionales usando funciones de cruce y mutación, las cuales aseguran que se mantengan las diversas soluciones. (Reeves, 1997).

En la estrategia evolutiva, se describen dos parámetros μ y λ . Una población conformada de μ soluciones que optimizan un problema, de los cuales dos padres son seleccionados. Estos padres son utilizados para generar una nueva solución de acuerdo a las combinaciones de sus variables de decisión. Luego sufren una mutación como una distribución Gausiana como un alejamiento de la existente solución. Este procedimiento es repetido λ ($\geq \mu$) en el tiempo y una nueva población es seleccionada usando una descendencia sola (μ y λ) estrategia o del set de soluciones completas ($\mu + \lambda$) estrategia. El tamaño de la distribución Gausiana es parametrizado por una variable σ . La cuestión de un valor apropiado para σ se puede manejar ordenadamente convirtiéndola en una variable de decisión auxiliar. Esto se trata de la misma manera que las variables de decisión reales. (Hoffmeister & Bäck, 1991)

Tabla 21 Softwares de Optimización en Simuladores Comerciales

Software de Optimización	Vendedor	Software de Simulación	Metodología de Optimización
AutoStat	Applied Materials, Inc.	AutoMod	Evolutionary strategy
Evolutionary Optimizer	Imagine That, Inc.	ExtendSim	Evolutionary strategy
OptQuest	OptTek Systems, Inc.	FlexSim, @RISK, Simul8, Simio, SIMPROCESS, AnyLogic, Arena, Crystal Ball, Enterprise Dynamics, ModelRisk	Scatter search, tabu search, neural networks, integer programming
SimRunner	ProModel Corp.	ProModel, MedModel, ServiceModel	Genetic algorithms and evolutionary strategies
RISKOptimizer	Palisade Corp.	@RISK	Genetic algorithm
WITNESS Optimizer	Lanner Group, Inc.	WITNESS	Simulated annealing, tabu search, hill climbing
GoldSim Optimizer	GoldSim Technology Group	GoldSim	Box's complex method
Plant Simulation Optimizer	Siemens AG	Siemens PLM software	Genetic algorithm
ChaStrobeGA	N/A	Stroboscope	Genetic algorithm
Global Optimization toolbox	The MathWorks	SimEvents (Matlab)	Genetic algorithms, simulated annealing, pattern search

Fuente: Amaran S. Et Al. (2016)

Los algoritmos genéticos son populares, ya que son fáciles de implementar y se utilizan en varios paquetes de software de optimización de simulación:

Posteriormente se hará un modelo de regresión multivariable, ya que se va estudiar la relación entre las variables independientes y la variable dependiente, así como cuales variables independientes pueden influir en la dependiente. La técnica de regresión múltiple se usa muy frecuentemente en el área de investigación. Se aplica para variables respuesta de tipo numérico, como las variables son de tipo cuantitativo, esta técnica es viable para esta investigación.

3.2.2 Aplicación del Software en la empresa de camiones pesados

La recolección de datos de entrada para el modelo de simulación, se hará en una empresa de camiones pesados, donde se tendrá acceso a la información histórica y se realizara toma de datos, así como también se hará un análisis estadísticos de los datos de entrada por medio del software Stat:FIT, ya que estos pueden tener valores aleatorios y es necesario representarlos con las distribuciones de probabilidad.

Los datos de entrada para el modelo serán, las estaciones de trabajo del área de ensamble, los tiempos de proceso de las estaciones, tiempos de ciclo, takt time, tamaños de lote, mezclas de productos, capacidades actuales instaladas y el plan de producción.

Para esta investigación el instrumento que se llevara a cabo es un modelo de simulación por computadora del proceso productivo del ensamble de camiones por medio del software promodel, de la empresa DAIMLER Autobuses Mercedes-Benz S. A., la cual ensambla chasises de los camiones urbanos, suburbanos y foráneos.

El problema de secuenciación se presentan actualmente ocurre en las líneas de camiones foráneos y urbanos. En la empresa DAIMLER, se manejan estaciones de

trabajo acomodadas de manera secuencial, las cuales las siguientes serán simuladas, en el siguiente orden presentado.

1. Armado de chasis y montaje de caja de direcciones
2. Escuadre y apriete de bastidor
3. Instalación de soportes de motor y radiador
4. Montaje de tubería hidráulica y flecha cardan
5. Montaje de ejes
6. Pintura de chasis
7. Secado de pintura & montaje de válvulas
8. Montaje de tanque de aire y combustible
9. Instalación de línea de aire y arnés principal 1
10. Instalación de línea de aire y arnés principal 2 y motor
11. Montaje de radiado
12. Montaje de escape y filtro de aire
13. Montaje de control delantero y baterías
14. Llenado de fluidos
15. Instalación de marcha
16. Montaje de llantas
17. Control de calidad
18. Salida de camión

Contando con las siguientes estaciones de sub-ensambles:

1. Sub-ensamble de largueros
2. Ensamble y sub-ensambles de ejes
3. Ensamble y sub-ensamble de válvulas
4. Ensamble y sub-ensamble de arnés
5. Ensamble y sub-ensamble de conjunto de enfriamiento
6. Ensamble y sub-ensamble de control delantero
7. Ensamble de fluidos y llantas
8. Colocación de cera y traslados de chasis.

3.2.2.1 Operacionalización de las Variables de la Hipótesis

Tabla 22 Operacionalización de las Variables

Variable	Definición	Unidad de Medición
Secuenciación	<p>“n piezas (lotes de piezas, pedidos u órdenes de trabajo) deben realizarse en m máquinas (recursos, secciones, puestos de trabajo). La realización de cada pieza implica la ejecución, en cierto orden establecido, de una serie de operaciones prefijadas donde cada operación está asignada a una de las m máquinas y tiene una duración (tiempo de proceso) determinada y conocida; debe establecerse un programa, es decir, la secuencia de operaciones en cada máquina y el intervalo temporal de ejecución de las operaciones”.</p> <p>Company's , Citado en (Fernandez-Baños Marín, 2003)</p>	Cumplimiento del plan de producción
		Producto terminado
		Productividad
		Tiempo total de producción
		Tiempo de ciclo total
Inventario en Proceso	<p>Todo artículo o elementos que se utilizan en un proceso de producción se los define como Inventario en proceso que tienen como característica que va aumentando su valor con cada proceso de transformación hasta convertirse en producto terminado. Es decir son productos parcialmente terminados que se encuentran en un grado intermedio de producción que fueron aplicados labor</p>	Utilización de las máquinas
		Piezas por hora producidas
		Tamaño de lote
		Producto terminado

	directa y gastos indirectos inherentes al proceso producción en un momento determinado. (Krajewski, L., & M., 2011).	
Tamaño de Lotes	Es la cantidad de materia prima, que entra en conjunto a un proceso productivo. (Aguirre, Müller, & Sebastian, 2008)	Cantidad de inventario en proceso
		Tamaño de lote optimo
Takt Time	El takt time, es el tiempo de trabajo disponible dividido por el número de unidades terminadas necesarias en ese periodo de tiempo. (Duannmu & Taaffe, 2007).	Producto terminado
		Utilización de las máquinas
		Tamaños de lote optimo
		Cuellos de botella
		Tiempos de operación
		Piezas por hora producidas
Mezcla de Productos	La mezcla de productos, también es conocida como la variedad de productos, se refiere al número total de línea de productos que una empresa puede ofrecer a sus clientes. (Valero, Garcia, Coronado, & Hernandez, 2011)	Tamaño optimo de lote
		Tiempos de ciclo
		Inventario en proceso
		Tiempo de ciclo
		Producto terminado
Cuellos de Botella	Un cuello de botella puede ser definido como cualquier recurso cuya capacidad es menor a la demanda requerida de él. En otras palabras, es un recurso que limita las piezas terminadas. En el punto en el proceso de producción donde el flujo tiende a ser más lento, los cuales pueden ser una máquina, operadores escasamente capacitados, herramientas especializadas, etc. (Goldratt y Cox, 1986).	Utilización de las máquinas
		Tamaño de lote optimo
		Producto terminado
		Tiempo de ciclo
		Piezas por hora producidas
	El ex presidente de Toyota, Fujio Cho define	Reducción de desperdicios
		Producto terminado

Generación de Desperdicios	desperdicio como “cualquier cosa que no sea la cantidad mínima de equipo, materiales, piezas, horas de trabajo absolutamente esencial para la producción”. Cualquier cantidad que exceda el mínimo requerido se considera un desperdicio, porque se invierte esfuerzo y material en algo que no es necesario en ese momento (Chase, Jacobs, & Aquilano, 2010).	Inventario en proceso
Tiempos de Paro	El tiempo de paro es definido como la cantidad de tiempo que puede transcurrir entre el inicio de una actividad A1 y que inicial en una actividad A2, siempre y cuando A1 preceda de A2. (Focacci, Laborie, & Nuijten, 2000)	Horas disponibles para trabajar
		Producto terminado
		Tiempo de demora en salida de un producto
Capacidad Instalada	La capacidad instalada es el potencial de producción o volumen máximo de producción que una empresa en particular, unidad, departamento o sección; puede lograr durante un período de tiempo determinado, teniendo en cuenta todos los recursos que tienen disponibles, sea los equipos de producción, instalaciones, recursos humanos, tecnología, experiencia/conocimientos, etc. (Jara, 2015).	Utilización de las máquinas
		Tamaños de lote optimo
		Tiempos de ciclo
		Piezas por hora producidas
		Mezcla de productos
		Tiempos de ciclo máximo por estación
		Tiempos de paro
Tiempo de Ciclo	El tiempo de ciclo de una línea es el tiempo máximo permitido para trabajar en la elaboración de una unidad en cada estación. Si el tiempo requerido para trabajar con los elementos	Cuellos de botella
		Takt time
		Piezas por hora producidas
		Producto terminado

	de una estación es mayor que el tiempo de ciclo de la línea, entonces seguramente habrá cuellos de botella en la estación, los cuales impedirán que la línea alcance su tasa de producción deseada. (Carro Paz & González Gómez, 2004)	
Tiempos de Operación por proceso	Es el intervalo de tiempo necesario para completar una orden de trabajo, con determinadas estaciones de trabajo (Mucientes, Vida, Bugarin, & Manuel, 2008)	Takt time
		Horas disponibles para trabajar
		Utilización de las máquinas
		Producto terminado
		Piezas por hora producidas
		Tiempo de ciclo

Fuente: Elaboración Propia

3.2.3 Validez de Contenido

Una vez que se diseñó el modelo de secuenciación de componentes con la aplicación del software de PROMODEL y con las características de las empresa de camiones

Se validó en tres etapas

1. Con el Coordinador de la mejora continua de la empresa y con el consultor de PROMODEL a nivel Latinoamérica.
2. Con los doctores.
3. Con una corrida de los datos históricos vs. Simulación

Para verificar el modelo de simulación de las líneas de ensamble de camiones pesados, se utilizara la producción real de camiones de cada mes del año 2017 y se determinara el promedio de la producción de piezas del modelo de simulación. Para lo anterior se realizaran 30 corridas de simulación cada una de ellas con

diferentes números aleatorios, se estableció una muestra de tamaño de 30 basado en el teorema del límite central.

Para la validación de los resultados que arroje el simulador se utilizara la prueba t-student con un nivel de significancia del 5% para comparar la producción de camiones reales y el promedio de camiones que da como resultado la simulación.

Las hipótesis estadísticas que se establecerán para la validación son:

H_0 : No existe diferencia significativa entre la producción de camiones reales y la producción de camiones del modelo de simulación.

H_1 : Existe diferencia significativa entre la producción de camiones reales y la producción de camiones del modelo de simulación.

Para la validación de los datos se utilizara la prueba t student y para esta se requieren dos muestras: una de las muestras serán de 12 datos de la producción real de camiones de cada mes y la otra de las muestras de los 12 valores generados en la simulación.

Así como también se hará una prueba F, para determinar si existen diferencias significativas entre las varianzas de las dos muestras.

Como restricción para estas pruebas es necesario que las dos muestras tengan una distribución normal.

Así como también se validara con 3 expertos

3.3 Número de réplicas

Como es un estudio experimental de simulación se utilizaran las réplicas.

Las muestras experimentales son conocidas como las réplicas.

Las réplicas de una simulación proporcionan observaciones múltiples que se pueden usar para estimar el valor esperado de la respuesta de salida del modelo.

Con resultados de salida de simulación aleatoria, no podemos determinar con certeza cuál será el verdadero resultado esperado del modelo a menos que en algún caso ejecutemos un número infinito de repeticiones, lo que no es posible o incluso deseable y por lo tanto es necesario calcular el número de réplicas (Harrell, Ghosh, & Bowden, 2004).

Antes de poder usar esta ecuación, se debe recopilar una muestra inicial de observaciones para calcular las desviaciones estándar de muestra de la salida del sistema.

3.4 Sujetos de Estudio

Este trabajo de investigación es sobre el modelo de optimización de la secuenciación de la producción de los componentes automotrices, se decidió hacer el estudio de campo en una empresa importante de este sector que está ubicada en García Nuevo León, dedicada a la fabricación de chasises para autobuses de los segmentos urbano, suburbano y foráneo, cubriendo el 56% del mercado nacional. Reportando esta planta en el año 2008 una producción record de 820 unidades producidas y 6,252 ventas totales. Al igual que muchas otras empresas automotrices, un requisito de competitividad es la calidad, el precio y la entrega a tiempo de sus productos.

Para el año 2015, la empresa comenzó con el esquema de trabajo con diversas carrocerías, con la finalidad de satisfacer las necesidades de los clientes. La planta cuenta con la certificación del Sistema de Gestión de Calidad ISO TS 16949 e ISO 14001 y con el certificado Industria Limpia, así como de Empresa Socialmente Responsable, además de Empresa Familiarmente Responsable. En este mismo año todo el portafolio autobusero de la marca se ofrece con tecnología Euro V. Se reporta la producción de la unidad completa 30,000 y el chasis 75,000. (Mercedes-Benz Corporation Mexico, 2018)

CAPITULO 4 ANALISIS DE RESULTADOS

El presente capítulo tiene como propósito el análisis de la prueba piloto de los resultados, de la investigación y la discusión de los mismos. En esta investigación se utilizaron para efecto de los resultados y pruebas de hipótesis, las herramientas de simulación por computadora y la regresión multivariable, las cuales serán explicadas más adelante.

4.1. Análisis cualitativo (Análisis con expertos)

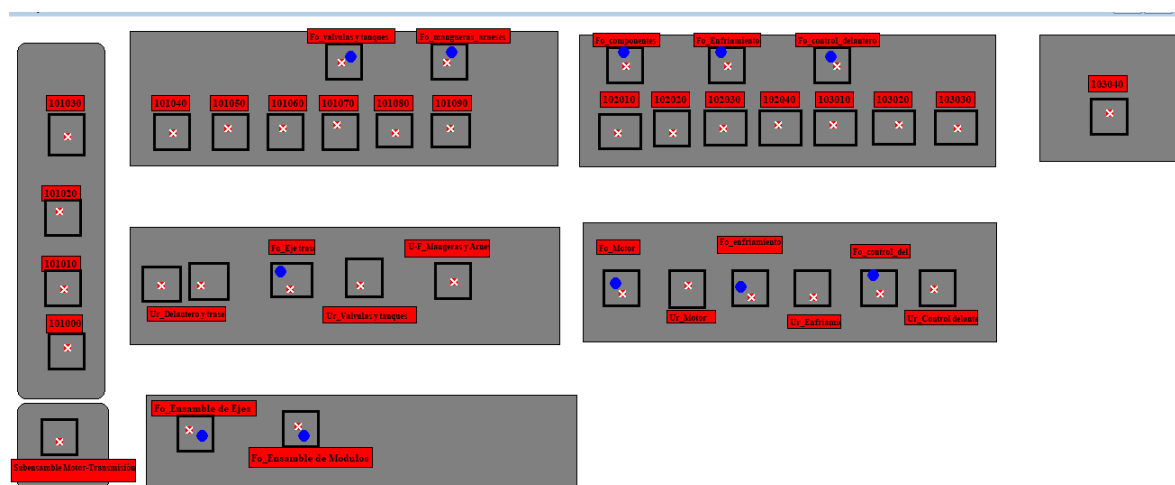
Para llevar a cabo la validación cualitativa de esta investigación, fue necesario hacer una revisión al modelo de simulación por computadora, el cual fue validado por el coordinador de mejora continua de la empresa de camiones pesados, quien constató que el modelo realizado reflejara el layout actual de la planta en lo que se refiere a procesos, estaciones de ensamble y recursos. Por otro lado se hizo una revisión del modelo de simulación por parte de un consultor del software Promodel a nivel Latinoamérica, para detectar errores posibles de programación. En ambas revisiones el resultado fue satisfactorio

4.2 Prueba Piloto

Como se mencionó en el capítulo tres esta investigación es experimental, por lo tanto no fue necesario la creación de un instrumento de medición para la variables; en este caso se utilizó un modelo de simulación por computadora de un proceso productivo. Por lo tanto para la prueba piloto no fue necesario el alpha de cronbach debido a que la base estadística y las características del caso requirieron una sola medición de las variables independientes y varias mediciones de la variable dependiente.

Se simuló el proceso productivo del ensamble de camiones pesados urbanos y foráneos por medio del software promodel. El modelo simulado incluye las 18 estaciones de ensamble de camiones urbanos y 12 estaciones de ensamble de camiones foráneos, las cuales a su vez comparten 8 estaciones de subensamble. Cabe mencionar que las estaciones esta representadas de manera secuencial como el proceso actual lo establece. En la figura 18 de muestra el modelo representado en el software Promodel.

Figura 18 Modelo de Simulación



Fuente: Elaboración Propia

Para el desarrollo de la prueba piloto se seleccionó, por una parte, tres variables independientes en base a dos criterios de selección:

- Las variables que fueron mayormente mencionadas en los estudios previamente revisados
- Las variables que tuvieron en los estudios previos, un mayor impacto en los resultados de la secuenciación de la producción.

Por otra parte, se consideraron otras tres variables en función de las tres estaciones que presentaron mayor porcentaje de bloqueo. Así se consideraron un total de seis variables independientes a comprobar. En base a estas variables se realizó un

diseño factorial básico 2^k el cual consta de dos niveles llamados nivel bajo (-) y nivel alto (+), con 6 factores (variables independientes). Los valores denominados altos y bajos fueron definidos para todas las variables en conjunto con la opinión del coordinador de mejora continua de la empresa. Cabe mencionar que para los tiempos de operación de las estaciones se realizó una prueba de bondad de ajuste para comprobar que la distribución de probabilidad se ajustará a los datos históricos y que tuviera una mayor variabilidad en los resultados obtenidos de la simulación. En este caso la distribución que se ajustó a los datos fue la distribución uniforme representada como $U(a \pm b)$ donde “a” representa el tiempo máximo de proceso que hubo en esa estación y “b” el tiempo mínimo de proceso. En la tabla 23 se muestran un resumen de los factores y sus niveles.

Tabla 23 Factores de entrada y sus niveles prueba Piloto

Variables Independientes	Descripción de Variables	Nivel Alto	Nivel Bajo
X1	Inventario en Proceso	1500 pzas.	1200 pzas.
X2	Tamaño de Lote	3000 pzas.	2400 pzas.
X3	Mezcla de Productos	20 pzas.	14 pzas.
X4	Tiempo de Proceso Estación 1	$U(154.45, 90.60)$ min	$U(46.20, 24.10)$ min
X5	Tiempo de Proceso Estación 2	$U(90.20, 57.35)$ min	$U(80.90, 48.20)$ min
X6	Tiempo de Proceso Estación 3	$U(238, 124)$ min	$U(100.10, 70.83)$ min

Fuente: Elaboración Propia

Para esta prueba piloto fue necesario aplicar réplicas de cada combinación de las variables previamente mencionadas. El número de réplicas se define como: “El número de veces que se observa la respuesta en cada combinación de los niveles experimentales a considerar”. En este caso se definieron dos niveles, alto y bajo, con 6 variables independientes y 5 réplicas dando un total de 320 réplicas.

Una vez definidas las variables independientes a utilizar en el modelo, se procedió a estudiar el comportamiento de tres variables dependientes definidas como: unidades terminadas (Y1); tiempo de finalización el cual es el tiempo que le toma al

chasis ingresar desde la primera estación de ensamble hasta la última (Y2), y el porcentaje de utilización de las estaciones (Y3); esto con el fin de validar las hipótesis previamente establecidas en el capítulo dos.

4.2.1 Resultados de la prueba piloto

Una vez definida las variables de estudio, se realizó por medio del software SPSS, un análisis de comparación de medias para encontrar que las variables independientes tuvieran medias significativas. En la tabla 24 se muestran los resultados obtenidos.

Siendo la hipótesis a comprobar la siguiente:

$$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$$

$$H_i: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$$

Donde:

μ_1 = la media de la variable independiente Xn valores bajos

μ_2 = la media de la variable independiente Xn valores altos

Tabla 24 Resumen de los resultados de SPSS Prueba de Medias (Prueba Piloto)

Variable	Valor	Y1			Y2			Y3		
		Media	StDev	P-Value	Media	StDev	P-Value	Media	StDev	P-Value
X1	Bajo	11.50	2.51	0.000	5906	1150	0.040	78.72	4.02	0.023
	Alto	13.26	3.81		5541	1913		77.51	5.33	
X2	Bajo	13.09	3.51	0.002	5473	1871	0.005	77.17	5.43	0.000
	Alto	11.94	3.24		5975	1192		79.06	3.73	
X3	Bajo	10.59	3.74	0.000	4835	1482	0.000	76.44	3.60	0.000
	Alto	14.44	1.42		6617	1118		79.79	5.16	
X4	Bajo	12.75	3.35	0.221	5508	1712	0.015	77.80	5.00	0.234
	Alto	12.28	3.49		5939	1423		78.43	4.48	
X5	Bajo	12.50	3.32	0.492	5600	1718	0.163	78.23	4.17	0.669
	Alto	12.25	3.18		5848	1437		78.00	5.27	
X6	Bajo	12.59	3.40	0.683	4952	1315	0.000	77.46	3.90	0.013
	Alto	12.44	3.45		6495	1457		78.78	5.40	

Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo a los resultados se confirmó que existe en la mayor parte de los casos diferencia entre las medias la cual valida que los datos que se obtuvieron de la simulación tuvieron variabilidad lo cual permite el uso del modelo propuesto. En la tabla 25 se muestran los resultados de las variables que fueron significativas.

Tabla 25 Resumen de la prueba de hipótesis aceptadas y su valor P-value

Variable	Y1	Y2	Y3
Inventario en Proceso (X1)	0.000	0.040	0.023
Tamaño de Lote (X2)	0.002	0.005	0.000
Mezcla de Productos (X3)	0.000	0.000	0.000
Estación 1 (X4)		0.015	
Estación 3 (X6)		0.000	0.013

Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

Fuente: Elaboración Propia

Como se puede observar se registraron que algunas variables no fueron significativas. Sin embargo para el desarrollo del modelo de regresión multivariable se utilizaron todas las variables y sus interacciones, a efecto de encontrar entre un conjunto de variables explicativas aquellas que provean una mejor explicación sobre las variables dependientes. Para el desarrollo del modelo se utilizó el software SPSS con el método stepwise o pasos sucesivos, el cual identifica en cada paso de la variable satisfaga los criterios de entrada y se valora si alguna de las variables cumplen con los criterios de salida. Con este método se midió la correlación parcial de cada una de las independientes sobre cada variable dependiente, así como la correlación entre las variables independientes. Aunado a ello, en cada paso se valoró la bondad de ajuste de los datos del modelo.

Para la construcción del modelo se tomaron las variables independientes y sus interacciones (combinaciones de las variables independientes) utilizando valores dicotómicos (0,1). Para cada variable dependiente se definió el siguiente modelo como:

$$Y = \beta_i + \beta_i X_i + \beta_i X_i + \dots \beta_n X_n + \beta_{ij} X_i * X_j + \varepsilon \quad (1)$$

Donde:

Y = La variable dependiente

β_i = coeficiente de regresión

X_i = variables independientes

$X_i * X_j$ = efectos de interacción

ε = Error

Una vez generados los diversos resultados que arrojó el programa, se procedió a la validación de la multicolinealidad de los datos (prueba estadística para corroborar que las variables no estuvieran correlacionadas entre sí). Debido a que se generaron más de un resultado para cada variable dependiente se seleccionó el mejor modelo basado en la R^2 mayor y cuyo índice de condición fuera menor a 15. En la tabla 26 se muestra un resumen de los datos obtenidos.

Tabla 26 Coeficientes de determinación del modelo resultado SPSS

Variables Dependientes	F	Sig.	R ²	Número de modelos	Índice de Condición
Y1	78.284	0.00%	71.70%	10	12.9
Y2	56.002	0.00%	72.00%	18	15.3
Y3	16.876	0.00%	30.30%	8	6.4

Fuente: Elaboración Propia

Posteriormente se generaron los coeficientes Beta (β), que se presentan en la Tabla 27, 28 y 29 respectivamente para Y1, Y2, Y3. Los coeficientes estandarizados en estas tablas fueron ordenados de mayor a menor.

Tabla 27 Coeficientes de β SPSS para Piezas Terminadas (Y1)

Variables	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.	Estadísticos de colinealidad	
	B	Error típ.	Beta			Tolerancia	FIV
(Constante)	11.497	.334		34.393	.000		
X1	4.262	.403	.640	10.573	.000	.250	4.000
X2	-3.375	.403	-.507	-8.371	.000	.250	4.000
X4	-3.238	.403	-.486	-8.030	.000	.250	4.000
X2X3	3.513	.403	.457	8.713	.000	.333	3.000
X3X4	3.238	.403	.421	8.030	.000	.333	3.000
X2X4	3.238	.403	.421	8.030	.000	.333	3.000
X3	1.625	.403	.244	4.031	.000	.250	4.000
X1X3	-1.762	.403	-.229	-4.372	.000	.333	3.000
X1X2	-1.762	.403	-.229	-4.372	.000	.333	3.000
X1X4	-1.487	.403	-.193	-3.690	.000	.333	3.000

Fuente: Elaboración Propia

Para el modelo piezas terminadas (Y1), la variable inventario en proceso (X1) con una Beta estandarizada $\beta = 0.640$ la cual es la más relevante y está relacionada de manera positiva, se puede decir que la hipótesis fue comprobada.

Para el caso de la variable tamaño de lote (X2) con una Beta estandarizada $\beta = -0.507$ la cual también fue una de las variables más relevantes y está relacionada de manera negativa, se puede concluir que la hipótesis no fue comprobada.

En la variable estación 1 (X4) con una Beta estandarizada $\beta = -0.486$ la cual también fue una de las variables más relevantes y está relacionada de manera negativa, se puede concluir que la hipótesis no fue comprobada.

Para la interacción tamaño de lote y mezcla de productos (X2X3) con una Beta estandarizada $\beta = 0.457$ la cual también fue una de las variables relevantes y está relacionada de manera positiva, se puede concluir que la hipótesis no fue comprobada

En la interacción mezcla de productos y estación 1 (X3X4) con una Beta estandarizada $\beta = 0.421$ la cual también fue una de las variables relevantes y está relacionada de manera positiva, se puede concluir que la hipótesis fue comprobada

En la interacción tamaño de lote y estación 1 (X2X4) con una Beta estandarizada $\beta = 0.421$ la cual también fue una de las variables relevantes y está relacionada de manera positiva, se puede concluir que la hipótesis fue comprobada

La variable mezcla de productos (X3) con una Beta estandarizada $\beta = 0.244$ fue de una de las variables poco relevantes. Si bien está relacionada de manera positiva, se puede decir que la hipótesis no fue comprobada.

La interacción de inventario en proceso y mezcla de productos (X1X3) con una Beta estandarizada de $\beta = -0.229$ fue poco relevante. Si bien está relacionada de manera negativa, se puede decir que la hipótesis si fue comprobada

En la interacción inventario en proceso y tamaño de lote (X1X2) con una Beta estandarizada de $\beta = -0.229$ fue poco relevante. Si bien está relacionada de manera negativa, se puede decir que la hipótesis no fue comprobada

La interacción inventario en proceso y estación 1 (X1X4) $\beta = -0.193$ fue poco relevante. Si bien está relacionada de manera negativa, se puede decir que la hipótesis si fue comprobada.

Tabla 28 Coeficientes de β SPSS para la variable Tiempo de Finalización (Y2)

Variables	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.	Estadísticos de colinealidad	
	B	Error típ.	Beta			Tolerancia	FIV
(Constante)	3556.108	185.898		19.129	.000		
X6	1545.833	166.272	.488	9.297	.000	.333	3.000
X3	1446.219	214.657	.457	6.737	.000	.200	5.000
X1	-1350.614	166.272	-.426	-8.123	.000	.333	3.000
X4	1056.081	166.272	.333	6.352	.000	.333	3.000
X2	1012.352	214.657	.320	4.716	.000	.200	5.000
X1X3	1145.394	191.995	.313	5.966	.000	.333	3.000
X5	824.032	166.272	.260	4.956	.000	.333	3.000
X1X2	826.306	191.995	.226	4.304	.000	.333	3.000
X2X6	-636.630	191.995	-.174	-3.316	.001	.333	3.000
X3X6	631.210	191.995	.173	3.288	.001	.333	3.000
X4X5	-628.714	191.995	-.172	-3.275	.001	.333	3.000
X2X4	-621.360	191.995	-.170	-3.236	.001	.333	3.000
X2X3	-588.576	191.995	-.161	-3.066	.002	.333	3.000
X3X5	-524.462	191.995	-.143	-2.732	.007	.333	3.000

Fuente: Elaboración Propia

Para el modelo de la variable dependiente tiempo de terminación (Y2), la variable estación 3 (X6) con una Beta estandarizada $\beta = 0.488$ es una de las más relevantes y está relacionada de manera positiva. Se puede decir que la hipótesis fue comprobada.

La variable mezcla de productos (X3) con una Beta estandarizada $\beta = 0.457$ es una de las más relevantes y está relacionada de manera positiva. Se puede decir que la hipótesis fue comprobada.

Para la variable inventario en proceso (X1) con una Beta estandarizada $\beta = -0.426$ fue también una de las más relevantes y está relacionada negativamente. Se puede concluir que la hipótesis no fue comprobada.

Para la variable inventario en proceso (X4) con una Beta estandarizada $\beta = 0.333$ fue algo relevantes y está relacionada positivamente. Se puede concluir que la hipótesis fue comprobada.

La variable tamaño de lote (X2) con una Beta estandarizada $\beta = 0.320$, fue algo relevante y está relacionada positivamente; se puede concluir que a mayor tamaño de lote, mayor tiempo de terminación. Por lo tanto si se puede aceptar la hipótesis.

La interacción de la variable inventario en proceso y mezcla de productos (X1X3) con una Beta estandarizada $\beta = 0.313$, fue algo relevante y está relacionada positivamente. Por lo tanto si se puede aceptar la hipótesis.

La variable estación 2 (X5) con una Beta estandarizada $\beta = 0.260$, fue algo relevante y está relaciona positivamente. Por lo tanto se acepta la hipótesis.

La interacción de las variables inventario en proceso y tamaño de lote (X1X2) con una Beta estandarizada $\beta = 0.226$, fue algo relevante y está relacionada positivamente. Por lo tanto si se acepta la hipótesis.

La interacción de las variables tamaño de lote y estación 3 (X2X6) con una Beta estandarizada $\beta = -0.174$, fue poco relevante y está relacionada negativamente. Por lo tanto si se acepta la hipótesis.

La interacción de las variables mezcla de productos y estación 6(X3X6) con una Beta estandarizada $\beta = 0.1.73$, fue poco relevante y está relacionada positivamente. Por lo tanto si se acepta la hipótesis.

La interacción de las variables estación 1 y estación 2 (X4X5) con una Beta estandarizada $\beta = -0.172$, fue poco relevante y está relacionada negativamente. Por lo tanto no se acepta la hipótesis.

La interacción de las variables tamaño de lote y estación 1 (X2X4) con una Beta estandarizada $\beta = -0.170$, fue poco relevante y está relacionada negativamente. Por lo tanto no se acepta la hipótesis.

La interacción de las variables tamaño de lote y mezcla de productos (X2X3) con una Beta estandarizada $\beta = -0.161$, fue poco relevante y está relacionada negativamente. Por lo tanto no se acepta la hipótesis.

La interacción de las variables mezcla de productos y tamaño de lote (X2X3) con una Beta estandarizada $\beta = -0.143$, fue poco relevante y está relacionada negativamente. Por lo tanto no se acepta la hipótesis.

Tabla 29 Coeficientes de β SPSS para % de Utilización de las estaciones (Y3)

Variables	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.	Estadísticos de colinealidad	
	B	Error típ.	Beta			Tolerancia	FIV
(Constante)	75.167	.447		168.227	.000		
X6	3.379	.714	.356	4.730	.000	.395	2.532
X1X4	2.971	.655	.271	4.538	.000	.627	1.595
X1X5	-2.957	.639	-.270	-4.629	.000	.658	1.519
X3	2.484	.571	.262	4.347	.000	.617	1.620
X2X5	2.442	.623	.223	3.921	.000	.693	1.443
X4X6	-2.207	.714	-.202	-3.090	.002	.527	1.899
X1X6	-1.905	.749	-.174	-2.543	.011	.479	2.089
X2X3	1.735	.707	.158	2.454	.015	.537	1.861

Fuente: Elaboración Propia

Para el modelo de la variable dependiente porcentaje de utilización de las estaciones (Y3) se encontró lo siguiente:

La variable estación 3 (X6) con una Beta estandarizada $\beta = 0.356$ fue una de las más relevantes y está relacionada positivamente. Por lo tanto se puede aceptar la hipótesis.

Para la interacción de la variable inventario en proceso y estación 1 (X1X4) con una Beta estandarizada $\beta = 0.271$ fue relevante y está relacionada positivamente. Por lo tanto si se puede aceptar la hipótesis.

La interacción de la variable inventario en proceso y estación 2 (X1X5) con una Beta estandarizada $\beta = -0.270$ fue relevante y está relacionada positivamente. Por lo tanto si se puede aceptar la hipótesis.

La variable Mezcla de Productos (X3) con una Beta estandarizada $\beta = 0.262$, fue algo relevante y está relacionada positivamente. Por lo tanto si se acepta la hipótesis.

La interacción de las variables tamaño de lote y estación 2 (X2X5) con una Beta estandarizada $\beta = 0.223$, fue algo relevante y está relacionada positivamente. Por lo tanto si se acepta la hipótesis.

La interacción de las variables estación 1 y estación 3 (X4X6) con una Beta estandarizada $\beta = -0.202$, fue algo relevante y está relacionada negativamente. Por lo tanto no se acepta la hipótesis.

La interacción de las variables inventario en proceso y estación 3 (X1X6) con una Beta estandarizada $\beta = -0.174$, fue algo relevante y está relacionada negativamente. Por lo tanto no se acepta la hipótesis.

Para la interacción de la variable tamaño de lote y mezcla de productos (X2X3) con una Beta estandarizada $\beta = 0.158$, fue poco relevante y está relacionada positivamente. Por lo tanto si se acepta la hipótesis.

A continuación se presentan los modelos de regresión multivariable:

Modelo para Piezas Terminadas (Y1)

$$11.5 + 1.6X3 + 4.3X1 - 1.8X1X2 + 3.5X2X3 - 1.5X1X4 + 3.2X3X4 - 3.4X2 - 3.2X4 + 3.2X2X4 - 1.8X1X3 \quad (2)$$

Modelo para Tiempo de Finalización (Y2)

$$3556.1 + 631.2X3X6 + 1446.2X3 + 1545.8X6 + 1012.4X2 + 1056.1X4 - 1350.6X1 + 1145.4X1X3 + 826.3X1X2 - 636.6X2X6 - 621.36X2X4 - 588.6X2X3 - 628.7X4X5 + 824.0X5 - 524.5X3X5 \quad (3)$$

Modelo para el porcentaje de utilización de las estaciones (Y3)

$$75.2 + 1.7X2X3 - 2.9X1X5 + 2.5X3 + 2.4X2X5 + 2.9X1X4 + 3.4X6 - 2.2X4X6 - 1.96X1X6 \quad (4)$$

Tabla 30 Resumen de las hipótesis aceptadas y rechazadas de la variable dependiente

Piezas Terminadas (Y1)

Piezas Terminadas (Y1)				
Variables	Descripción de Variables	Coefficientes estandarizados	Sig.	¿Se acepta Hipótesis?
		Beta		
X1	Inv. En proceso	0.640	0.000	Si
X2	Tamaño de lote	-0.507	0.000	No
X4	Estación 1	-0.486	0.000	No
X2X3	Tamaño de lote y Mezcla de productos	0.457	0.000	No
X3X4	Mezcla de productos y estación 1	0.421	0.000	Si
X2X4	Tamaño de lote y estación 1	0.421	0.000	Si
X3	Mezcla de productos	0.244	0.000	No
X1X3	Inv. En proceso y mezcla de productos	-0.229	0.000	Si
X1X2	Inv. En proceso y tamaño de lote	-0.229	0.000	No
X1X4	Inv. En proceso y estación 4	-0.193	0.000	Si

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 31 Resumen de las hipótesis aceptadas y rechazadas de la variable dependiente

Tiempo de Finalización (Y2)

Tiempo de Finalización (Y2)				
Variables	Descripción de Variables	Coefficientes estandarizados	Sig.	¿Se acepta Hipótesis?
		Beta		
X6	Estación 3	0.488	0.000	Si
X3	Mezcla de productos	0.457	0.000	Si
X1	Inv. En proceso	-0.426	0.000	No
X4	Estación 1	0.333	0.000	Si
X2	Tamaño de Lote	0.320	0.000	Si
X1X3	Inv. En proceso y Mezcla de productos	0.313	0.000	Si
X5	Estación 2	0.260	0.000	Si
X1X2	Inv. En proceso y tamaño de lote	0.226	0.000	Si
X2X6	Tamaño de lote y estación 3	-0.174	0.001	Si
X3X6	Mezcla de productos y estación 3	0.173	0.001	Si
X4X5	Estación 1 y Estación 2	-0.172	0.001	No
X2X4	Tamaño de lote y estación 1	-0.170	0.001	No
X2X3	Tamaño de lote y mezcla de productos	-0.161	0.002	No
X3X5	Mezcla de productos y estación 2	-0.143	0.007	No

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 32 Resumen de las hipótesis aceptadas y rechazadas de la variable dependiente

% de Utilización de Estaciones (Y3)

% de Utilización (Y3)				
Variables	Descripción de Variables	Coeficientes estandarizados	Sig.	¿Se acepta Hipótesis?
		Beta		
X6	Estación 3	0.356	0.000	Si
X1X4	Inv. En proceso y estación 1	0.271	0.000	Si
X1X5	Inv. En proceso y estación 2	-0.270	0.000	No
X3	Mezcla de productos	0.262	0.000	Si
X2X5	Tamaño de lote y estación 2	0.223	0.000	Si
X4X6	Estación 1 y Estación 6	-0.202	0.002	No
X1X6	Inv. En proceso y estación 6	-0.174	0.011	No
X2X3	Tamaño de lote y mezcla de productos	0.158	0.015	Si

Fuente: Elaboración Propia

4.3 Resultados finales

4.3.1 Análisis estadístico

Para el análisis final se utilizaron 2 técnicas, la primera es el diseño factorial básico 2^k el cual consta de dos niveles llamados nivel bajo (-) y nivel alto (+), con 9 factores (variables independientes) Tabla 33. Esta técnica se utilizó para poder generar los datos que se van utilizar para el modelo de regresión multivariable el cual se describe más adelante.

Tabla 33 Factores de Entrada y sus niveles

Diseño Experimental Final			
Independent Variables	Factor Description	High Level	Low Level
X1	Inventory in Process	1500 pcs.	1200 pcs.
X2	Batch Size	3000 pcs.	2400 pcs.
X3	Product Mix	20 pcs.	14 pcs.
X4	Processing Time Station 1	U(154.45, 90.60) min	U(46.20, 24.10) min
X5	Processing Time Station 3	U(238, 124)min	U(100.10, 70.83) min
X6	Montaje de Radiador (Tiempo de Paro)	90 Min	30 min
X7	Montaje de Portería (Tiempo de Paro)	95 min	25 min
X8	Desperdicios Ensamble de tanques (Retrabajos)	5%	1%
X9	Capacidad Instalada	3 turnos x 8 hras	1 turno x 8has

Fuente: Elaboración Propia

Donde se generaron 512 corridas (2^9) con 5 réplicas dando un total de 2560 réplicas finales.

La segunda técnica que se utilizó fue la regresión multivariable para generar el modelo causa-efecto.

Cabe mencionar que las variables que se utilizaron para generar los modelos fueron Inventario en Proceso, Tamaño de Lote, Takt Time, Mezcla de Productos, Cuellos de Botella, Retrabajo (Desperdicios), Tiempo de Paro, Capacidad Instalada, Tiempo de Ciclo y Tiempo de Operación.

Se generaron 3 modelos para analizar el comportamiento de las siguientes variables independientes: unidades terminadas (Y1); tiempo de finalización el cual es el tiempo que le toma al chasis ingresar desde la primera estación de ensamble hasta la última (Y2), y el porcentaje de utilización de las estaciones (Y3).

Para el desarrollo de los modelos se utilizó el software SPSS con el método stepwise o pasos sucesivos. Para la construcción de los modelos se utilizaron los datos obtenidos de la simulación como factores principales. Para cada variable dependiente se definió el siguiente modelo como:

$$Y = \beta_i + \beta_i X_i + \beta_i X_i + \dots \beta_n X_n + \beta_{ij} X_i * X_j + \varepsilon \quad (1)$$

Una vez generados los diversos resultados que arrojó el programa, se procedió a la validación de la multicolinealidad de los datos (prueba estadística para corroborar que las variables no estuvieran correlacionadas entre sí). Debido a que se generaron más de un resultado para cada variable dependiente se seleccionó el mejor modelo basado en la R^2 mayor y cuyo índice de condición fuera menor a 15. En la tabla 34 se muestra un resumen de los datos obtenidos.

Tabla 34 Coeficientes de determinación del modelo resultados en SPSS

Variables Dependientes	F	Sig.	R ²	Número de modelos	Índice de Condición
Y1	24445.79	0.00%	85%	6	9.123
Y2	829.87	0.00%	62%	5	6.640
Y3	234.58	0.00%	27%	4	5.449

Fuente: Elaboración Propia

Posteriormente se generaron los coeficientes Beta (β), que se presentan en la Tabla 35, 36 y 37 respectivamente para Y1, Y2, Y3. Los coeficientes estandarizados en estas tablas fueron ordenados de mayor a menor.

Tabla 35 Coeficientes de β SPSS para la variable dependiente Piezas Terminadas (Y1)

Variables	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.	Estadísticos de colinealidad	
	B	Error típ.	Beta			Tolerancia	FIV
(Constante)	14.686	.307		47.807	.000		
capinst	17.292	.190	.762	91.088	.000	.830	1.204
mezcl	8.675	.209	.382	41.566	.000	.687	1.456
takt	-.094	.005	-.204	-19.949	.000	.558	1.793
ciclo	-.003	.000	-.136	-15.583	.000	.766	1.305
invpro	.017	.004	.032	3.831	.000	.814	1.229
tamalot	.406	.183	.018	2.213	.027	.889	1.125

Fuente: Elaboración Propia

Para el modelo de la variable dependiente piezas terminadas (Y1) se encontró lo siguiente:

La variable capacidad instalada con una Beta estandarizada $\beta = 0.762$ fue una de las más relevantes y está relacionada positivamente. Por lo tanto se puede aceptar la hipótesis.

La variable mezcla de productos con una Beta estandarizada $\beta = 0.382$ fue otra de las variables relevantes y está relacionada positivamente. Por lo tanto se puede aceptar la hipótesis.

La variable takt time con una Beta estandarizada $\beta = -0.204$ fue una de las variables medianamente relevantes y está relacionada negativamente. Por lo tanto se puede aceptar la hipótesis.

La variable tiempo de ciclo con una Beta estandarizada $\beta = -0.136$ fue una de las medianamente relevantes y está relacionada negativamente. Por lo tanto se puede aceptar la hipótesis.

La variable inventario en proceso con una Beta estandarizada $\beta = .032$ fue una de las poco relevantes y está relacionada positivamente. Por lo tanto se puede aceptar la hipótesis.

La variable tamaño de lote con una Beta estandarizada $\beta = 0.018$ fue una de las variables poco relevantes y está relacionada positivamente. Por lo tanto se puede aceptar la hipótesis.

**Tabla 36 Coeficientes de β SPSS para la variable dependiente
Tiempo de Finalización (Y2)**

Variables	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig.	Estadísticos de colinealidad	
	B	Error típ.	Beta			Tolerancia	FIV
(Constante)	253.140	15.732		16.091	.000		
paro	.10	.000	.519	40.802	.000	.922	1.084
cuello	.438	.020	.345	22.442	.000	.632	1.584
takt	3.165	.304	.154	10.407	.000	.680	1.472
capins	-109.681	14.203	-.109	-7.722	.000	.746	1.341
tamaño	56.818	12.312	.057	4.615	.000	.992	1.008

Fuente: Elaboración Propia

Para el modelo de la variable dependiente tiempo de finalización (Y2) se encontró lo siguiente:

La variable tiempo de paro con una Beta estandarizada $\beta = 0.519$ fue una de las variables más relevantes y está relacionada positivamente. Por lo tanto se puede aceptar la hipótesis.

La variable cuello de botella con una Beta estandarizada $\beta = 0.345$ fue una de las variables algo relevante y está relacionada positivamente. Por lo tanto se puede aceptar la hipótesis

La variable takt time con una Beta estandarizada $\beta = 0.154$ fue una de las variables mediamente relevante y está relacionada positivamente. Por lo tanto se puede aceptar la hipótesis

La variable capacidad instalada con una Beta estandarizada $\beta = -0.109$ fue una de poco relevante y está relacionada negativamente. Por lo tanto se puede aceptar la hipótesis

La variable tamaño de lote con una Beta estandarizada $\beta = 0.057$ fue una de las variables poco relevante y está relacionada positivamente. Por lo tanto se puede aceptar la hipótesis.

Tabla 37 Coeficientes de β SPSS para la variable dependiente
% de Utilización de las estaciones (Y3)

Variables	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.	Estadísticos de colinealidad	
	B	Error típ.	Beta			Tolerancia	FIV
(Constante)	-61.117	4.623		-13.220	.000		
cuello	-.155	.005	-.565	-29.545	.000	.782	1.278
capinst	66.507	3.888	.306	17.107	.000	.894	1.119
paro	-.001	.000	-.172	-9.770	.000	.918	1.089
mezcla	29.824	3.814	.137	7.820	.000	.929	1.077

Fuente: Elaboración Propia

La variable cuello de botella con una Beta estandarizada $\beta = -0.565$ fue una de las variables más relevantes y está relacionada negativamente. Por lo tanto se puede aceptar la hipótesis.

La variable capacidad instalada con una Beta estandarizada $\beta = 0.306$ fue una de las variables algo relevante y está relacionada positivamente. Por lo tanto se puede aceptar la hipótesis.

La variable tiempo de paro con una Beta estandarizada $\beta = -0.172$ fue una de las variables poco relevante y está relacionada negativamente. Por lo tanto se puede aceptar la hipótesis.

La variable mezcla de productos con una Beta estandarizada $\beta = 0.137$ fue una de las variables poco relevante y está relacionada positivamente. Por lo tanto se puede aceptar la hipótesis.

A continuación se presentan los modelos de regresión multivariable:

Modelo para Piezas Terminadas (Y1)

$$14.686 + 17.292capinst + 8.675mezcla - 0.094takt - 0.003tiemciclo \\ + 0.017invproc + 0.406tamalot$$

Modelo para Tiempo de Finalización (Y2)

$$253.140 + 0.10paro + 0.438cuello + 3.165takt - 109.681capinst + 56.818tam$$

Modelo para Porcentaje de Utilización (Y3)

$$-61.117 - 0.155cuello + 66.507capinst - 0.001paro + 29.824mezcla$$

4.3.1.1 Superficie de Respuesta

Siendo desarrollado el modelo de simulación y correr cada uno de los experimentos definidos. Una de las maneras de analizar los resultados, fue por medio de la superficie de respuesta en el cual se simplifica la predicción de las variables se identifican los valore máximo o mínimos

Esta metodología fue desarrollada por el estadístico británico George E. P. Box y el químico británico K. B. Wilson, quienes trabajaron en la industria química en Manchester, Inglaterra.

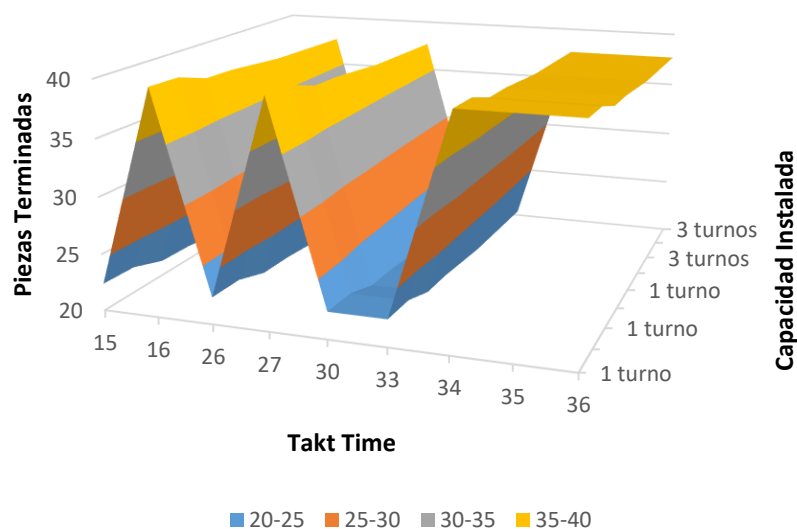
El primer paso para usar esta metodología es correr una serie de simulaciones utilizando el diseño factorial, identificando aquellas variables que son más significativas y explicativas.

El segundo es determinar por medio de las ecuaciones de regresión lineal multivariable, predecir las respuestas el comportamiento y graficar en tres dimensiones.

Lo que se hizo para cada una de las variables independientes: Piezas Terminadas (Y1), Tiempo de Finalización (Y2) y Porcentaje de Utilización (Y3), fue generar las superficies de respuesta correspondientes, las cuales se muestran a continuación:

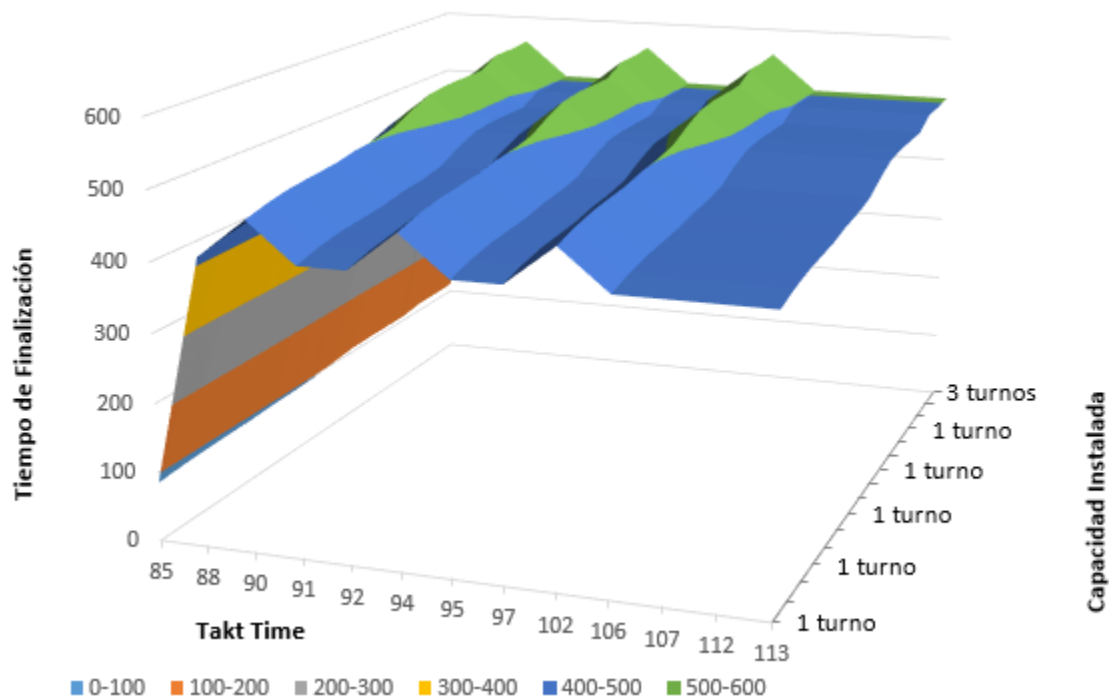
Para la gráfica de superficie de respuesta de piezas terminadas (Y1), se tomaron los valores más significativos que salió del modelo de regresión, capacidad instalada y takt time, como se puede apreciar con estas dos variables el punto óptimo de este modelo es cuando se empiezan a generar 38 unidades con un takt time de 35 minutos y 1 turno de 8 horas. Véase Gráfica 6.

Gráfica 6 Superficie de respuesta Piezas Terminadas (Y1)



Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 7 Superficie respuesta tiempo de finalización (Y2)



Fuente: Elaboración Propia

En la gráfica 7 se utilizaron las variables takt time y capacidad instalada, como se puede apreciar, que con un takt time de 102 minutos y con 1 turno de ocho horas, se llega al valor óptimo de 466 minutos en el tiempo de finalización.

Como el modelo de porcentaje de utilización (Y3), nos dio un valor R^2 de 27%, no se considera lo suficientemente explicativo para poder graficar al menos dos variables para la superficie de respuesta, por lo tanto se excluyó.

Con estos modelos se pueden predecir valores de repuesta de las variables y parámetros que fueron simulados.

4.3.1.2 Optimización de las Variables

A partir de las ecuaciones de regresión lineal multivariable obtenidas en el paso anterior, se diseñó el modelo matemático para la optimización de nuestro caso de estudio. Las siguientes funciones objetivo fueron definidas: maximizar las piezas terminadas, minimizar el tiempo de proceso y maximizar los % de utilización de las estaciones de trabajo.

Se decidió utilizar las técnicas meta heurísticas de las herramientas de Solver de Excel y Simmrunner de Promodel. En la tabla 38 se muestran los resultados obtenidos:

Tabla 38 Optimización Solver Vs Promodel

VARIABLES		ESCALA	SOLVER	PROMODEL		
X1	Capacidad Instalada	1	8	8		
X2	Mezcla de Productos	1	20	20		
X3	Takt Time	1	205	205		
X4	Tiempo de Ciclo	1	300	300		
X5	Inventario En Proceso	1	1,500	1,500		
X6	Tamaño de Lote	1	3,000	3,000		
X7	Tiempo de Paro	1	4	4		
X8	Cuello de Botella	1	450	450		
Max	Y1	Piezas Terminadas	1	1,551	1,551	100.00%
Min	Y2	Minutos de Proceso	1	170,676	170,676	100.00%
Max	Y3	% de Utilización	10000	998	998	100.00%
Integración			173,225	173,225	100.00%	

Fuente: Elaboración Propia

Como se puede apreciar en la tabla 38 los resultados del Solver y Promodel fueron congruentes y óptimos, por lo que en máximo de piezas que se puede producir son 1,551 unidades, el tiempo mínimo que puede haber para la finalización del proceso es 170,676 minutos y el máximo porcentaje de utilización de 0.0998, esto con las condiciones de las variables independientes obtenidas.

4.3.1.2 .1 Análisis de los datos y toma de decisiones

A continuación se presenta un análisis comparativo de la situación actual de la empresa vs nuestras soluciones propuestas con los valores óptimos.

Tabla 39 Actual Vs Óptimo

Variables	Actual	Óptimo
Takt Time (min)	45	25
Tiempo de Ciclo (min)	540	300
Unidades Máximas a Producir	84	151

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 39 con un turno de 8 horas en ambos escenarios, la empresa en sus condiciones actuales laborables, puede producir como máximo 126 unidades, mientras que en nuestro modelo propuesto se puede producir 151 unidades máximas, lo que representa un aumento en el 20% de la producción, generando a su vez un ingreso de \$740,031 USD.

La línea de ensamble de camiones pesados, cuenta actualmente con nueve estaciones de subensambles, las cuales se encargan de suministrar los kit de productos semi ensamblados a la línea, una de las problemáticas que muestra la empresa es que no sabe cuáles son las cantidades optimas que debe tener de esos kits, ni cuál es la capacidad adecuada para las estaciones de subensamble, lo que genera tener un costo alto de inventario en proceso anual teniendo un costo de inventario promedio actual de \$ 4 Millones de USD. Considerando la tasa de interés actual como un costo de capital en 5% se obtuvo un beneficio de \$208,000 USD y con una reducción del 25% dio un total de \$52,000 USD. En la tabla 32 se muestra como se encuentra la situación actual y la propuesta.

Tabla 40 Actual Vs Óptimo

Variables	Actual	Óptimo
Inventario en Proceso	2,600	2,000
Tamaño de Lote	5,000	4,000

Fuente: Elaboración Propia

Otra de las propuestas de mejora, es el pago de las horas extras, debido a los cuellos de botella que se presentan en la línea de producción por la falta de recursos para operar en las estaciones de ensamble y por la alta rotación del personal; así como también los paros inesperados en la línea debido a la falta de suministros de los kits de las estaciones de subensambles. Con las condiciones actuales la empresa puede tener un tiempo de finalización de la producción mínimo de 280,712 minutos, mientras que nuestro modelo se podría tener 135,829 minutos, lo que representa una disminución de 144, 883 minutos (2,415 horas), lo que representaría un ahorro de \$56,161 USD, anuales, en el pago de las horas extras.

Tabla 41 Actual Vs Óptimo

Variables	Actual	Óptimo
Cap. Instalada (hras)	8	8
Takt Time (min)	45	25
Tamaño de Lote (unidades)	5,000	2,400
Tiempo de Paro (hras)	5	1
Cuello de Botella (min)	500	25
Tiempo de Finalización (Min)	280,712	135,829

Fuente: Elaboración Propia

4.3.1.3 Costos

Para poder ampliar nuestra propuesta de mejora, en base a la simulación se decidió generar un estimado de costos en función de las corridas que se generaron en las simulaciones, en este caso se utilizó la producción promedio que se tuvo en cada una de las corridas. Véase anexo 1

Obteniendo los siguientes resultados:

Si la empresa desea operar en las condiciones actuales 1 turno de producción y con 91 operarios, debe al menos producir 9 unidades por turno generando un costo por unidad producida de \$785,210.4 MX, llegando a generar un 54% de margen de utilidad.

Por otro lado si la empresa quiere llegar a producir a su máxima capacidad 44 camiones, tendría que aumentar a 3 turnos y 273 operarios totales, esto le generaría un costo por unidad producida de \$998,277.0 MX, esta opción genera un 41% del margen de utilidad.

Nuestra recomendación es que la empresa con sus condiciones actuales debe producir un máximo de 19 unidades por turno, teniendo un costo de producción de \$869,649.26 MX, la cual generaría una utilidad del 51%.

CONCLUSIONES Y RECOMENTADACIONES

El objetivo principal de esta investigación fue proponer un modelo que optimice la secuenciación de la producción de las líneas de ensamble de camiones pesados, así como también cuáles son las variables que tienen un mayor impacto. Siendo este objetivo cumplido mediante el desarrollo del modelo de simulación y los modelos de regresión multivariable.

La metodología que se utilizó para el desarrollo de esta investigación fue un modelo de simulación por computadora del proceso productivo del ensamble de camiones pesado, así como los modelos de regresión multivariable. En este diseño experimental se utilizaron tres variables de respuesta relevantes que se encuentran muy frecuentes en el sector de manufacturero; piezas terminadas (Y1), tiempo de finalización (Y2) y porcentaje de utilización (Y3). En cuanto al conjunto de variables independientes ($X1...X9$), que se modelaron en esta investigación con datos históricos proporcionados por una empresa de ensamble de camiones pesados ubicada en el área metropolitana de Monterrey. Se construyeron distribuciones específicas utilizando un año de datos. Algunos de esos datos se basaron en distribuciones normales y uniformes.

La experimentación fue un diseño factorial simple con valores alto y bajo, para medir los factores ($X1...X9$). Para cada combinación de factores (9) se aplicaron cinco réplicas con una muestra de 2560 réplicas.

Los modelos de regresión lineal multivariable cumplen con los supuestos de no tener datos con multicolinealidad. De acuerdo a Belsley et al (1980) desarrollo un indicador denominado el índice de condición, el cual mide la sensibilidad de las estimaciones mínimas cuadráticas ante pequeños cambios en los datos y hace mención que si los datos observados tanto simulados muestran un índice de condición entre los rangos veinte y treinta. Estos presentan un grave problema de multicolinealidad. En esta investigación este indicador fue menor a quince, por lo tanto no existe el problema de la multicolinealidad.

De acuerdo al ejercicio econométrico que se realizó en el capítulo 4 permitió, confirmar o rechazar las siguientes hipótesis.

Con respecto a la variable dependiente **piezas terminadas (Y1)**, el conjunto de variables explicativas que resultaron significativas y positivas fueron las siguientes: capacidad instalada $\beta = 17.292$, mezcla de productos $\beta = 8.675$, inventario en proceso $\beta = 0.017$ y tamaño de lote $\beta = 0.406$. Por otro lado las variables: takt time $\beta = -0.04$ y tiempo de ciclo $\beta = -0.003$, tuvieron un impacto negativo.

Para la hipótesis referente a la capacidad instalada, se puede concluir que fue una variable con un efecto positivo y significativo, se puede concluir que entre mayor capacidad instalada será mayor la cantidad de piezas terminadas. Esta hipótesis fue reforzada por los autores Parello et al (1986), Ulgen et al (1989, 1995, 1998).

En las hipótesis relacionada con la mezcla de productos, entre mayor mezcla de productos, mayor la cantidad de piezas terminadas. Los autores: Valero, H.M. et al (2011), Tiacci, L. et al (2007), refuerzan esta hipótesis. Por lo tanto se acepta.

Con respecto a la hipótesis relacionada con el inventario en proceso, se puede concluir que fue una de las variables con un efecto directo y significativo con las piezas terminadas, ya que se puede concluir que entre mayor cantidad de inventario en proceso mayor será la cantidad de piezas terminadas. Los estudios previamente revisados confirman que al tener las cantidades optimas de inventario en proceso, las piezas terminadas tienden a aumentar los autores que también lo demuestran son (Krystek, J. et al (2016), Selected T. R. (2016), Duannmu, J. et al (2007).

Para la hipótesis de la variable tamaño de lote (X2), que a mayor cantidad de tamaño de lote, mayor cantidad de piezas terminadas. Los autores: Burbano Arias, J.F. (2011), Aguirre et al (2008), Drexler, A. et al (2006), mencionan que al tener un tamaño de lote mayor de componentes en las líneas de ensamble se trabajarían de manera continua y por lo tanto se tendrían más piezas terminadas. En este caso la hipótesis si es aceptada.

Para la hipótesis del tiempo takt time, fue una variable con efecto negativo y significativa, ya que el tener un menor tiempo takt de producción, las piezas terminadas disminuyen, esto es validado por los autores: Barra et al (2007), Duannmu et al. (2007), Chase et. al (2010), quienes hacen incapie que si no se tiene un ritmo constante en el tiempo takt no se podría cumplir con los planes de producción establecidos.

Para la hipótesis tiempo de ciclo, fue una variable de efecto negativo y significativa, ya que el tener un menor tiempo de ciclo, las piezas terminadas de disminuyen. Esto fue reforzado por los autores: Parello et al (1986), Carro Paz et al (2004), Wirabhuaana et al (2008).

Para este modelo no se pudieron comprobar las variables: cuellos de botella, re trabajo, tiempo de paro y tiempo de operación.

En el modelo de la variable dependiente **tiempo de terminación (Y2)**, el conjunto de variables explicativas que resultaron significativas y positivas fueron las siguientes: tiempo de paro $\beta = 0.010$, cuello de botella $\beta = 0.438$, takt time $\beta = 3.165$, capacidad instalada $\beta = -109.681$ y tamaño de lote $\beta = 56.818$

En el caso de la variable tiempo de paro la hipótesis a comprobar es que al tener un mayor tiempo de paro, tendría un tiempo de finalización de la producción mayor. Los autores Focacci et al. (2000), Artigues et al (2003 y 2004), confirman esta teoría por lo tanto se acepta.

Para la variable cuello de botella, la hipótesis a comprobar es si a mayor cuello de botella, mayor tiempo de finalización. Esta hipótesis fue comprobada y reforzada por los estudios de Ülgen et al (1995,1998), Ismail et al (2002), Duannmu et al (2007)

La variable capacidad instalada, la hipótesis a comprobar es si a mayor capacidad instalada, menor tiempo de finalización. Esta hipótesis fue comprobada y reforzada por los estudios de Parello et al (1986), Ulgen et al (1989, 1995,1998).

Para la variable tamaño de lote, la hipótesis a comprobar fue que al tener un mayor tamaño de lote, un mayor tiempo de terminación como lo menciona Carro Paz et al (2004), la hipótesis si fue comprobada.

Para el caso de la variable independiente **porcentaje de utilización (Y3)**, el conjunto de variables explicativas que resultaron significativas y positivas fueron las siguientes: capacidad instalada $\beta = 66.507$ y mezcla $\beta = 29.824$ y la negativas fueron tiempo de paro $\beta = -.001$ y cuello de botella $\beta = -0.155$.

La hipótesis capacidad instalada, a mayor capacidad instalada, mayor porcentaje de utilización, se comprobó la hipótesis y se reforzó con los estudios de Parello et al (1986), Ulgen et al (1989, 1995,1998).

En la hipótesis a comprobar de mezcla de productos fue que a mayor mezcla de productos, mayor tiempo de utilización de las estaciones de trabajo esta hipótesis fue reforzada por el autor Trakultogchai et al. (2013), esta hipótesis si se comprobó debido a que las estaciones presentaron un mayor tiempo de utilización al momento de procesar las mezclas de producción más complejas en el modelo de simulación.

Para la variable cuello de botella, se comprobó que al tener un mayor cuello de botella un menor tiempo de utilización, la hipótesis si fue comprobada y reforzada por los autores: Ulgen et al (1989, 1995,1998), Ismail et al (2002), Wirabhuanna et al (2008).

En la hipótesis del tiempo de paro se comprobó que a mayor tiempo de paro, menor % de operación fue aceptada y validada por los estudios de Focacci et al (2000), Artigues et al (2003 y 2004).

Se muestra en resumen de las hipótesis aceptadas y rechazadas para cada variable dependiente. Tabla 42.

Tabla 42 Resumen de hipótesis aceptadas y rechazadas

Descripción	Y1	Y2	Y3
Inventario en proceso (X1)	✓		
Tamaño de Lote (X2)	✓	✓	
Takt time (X3)	✓	✓	
Mezcla (X4)	✓		✓
Cuello de Botella (X5)		✓	✓
Retrabajo (X6)			
Tiempo de Paro (X7)		✓	✓
Capacidad Instalada (X8)	✓	✓	✓
Tiempo de Ciclo (X9)	✓		
Tiempo de Operación (X10)			

Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos

En los modelos presentados llama la atención que las variables independientes re trabajo y tiempo de operación no aparecieron en ninguno de los modelos presentados.

Para el modelo de la variable dependiente porcentaje de utilización (Y3), resulto ser un modelo significativo de acuerdo a la regresión pero obtuvo una R^2 de 27% por lo tanto la variables que se utilizaron no afectan el resultado para la Y3 para estudios futuros se recomienda utilizar otra variables, ya que desde la prueba piloto no se obtuvieron los resultados esperados.

Este modelo se puede utilizar en otras empresas manufactureras de la región o incluso en la industria automotriz en el segmento de ligeros.

El uso de la simulación por computadora ayudo a generar la información de manera casi inmediata, esto sin afectar el sistema real.

Los modelos presentados demostraron ser significativos, se utilizaron los datos de una sola empresa. Para futuras investigaciones se recomienda la integración de información de otras empresas, así como también agregar otras variables que afectan a la secuenciación.

Anexos

Costo Total de Materia Prima						
Unidades Producidas	9	10	11	12	13	14
Costo Unitario de Materia Prima	\$ 700,000.00	\$ 700,000.00	\$ 700,000.00	\$ 700,000.00	\$ 700,000.00	\$ 700,000.00
Costo Total de Materia Prima	\$ 6,300,000.00	\$ 7,000,000.00	\$ 7,700,000.00	\$ 8,400,000.00	\$ 9,100,000.00	\$ 9,800,000.00
Costo Total de Mano de Obra						
Unidades Producidas	9	10	11	12	13	14
Costo Unitario de Mano de Obra	\$ 60,606.00	\$ 60,606.00	\$ 60,606.00	\$ 60,606.00	\$ 60,606.00	\$ 60,606.00
Costo Total de Mano de Obra	\$ 545,454.00	\$ 606,060.00	\$ 666,666.00	\$ 727,272.00	\$ 787,878.00	\$ 848,484.00
Costo Total de Gastos Indirectos						
Unidades Producidas	9	10	11	12	13	14
Costo Unitario de Gastos Indirectos	\$ 31,850.00	\$ 31,850.00	\$ 31,850.00	\$ 31,850.00	\$ 31,850.00	\$ 31,850.00
Costo Total de Gastos Indirectos (Mano de Obra, Costos de Ensamble)	\$ 286,650.00	\$ 318,500.00	\$ 350,350.00	\$ 382,200.00	\$ 414,050.00	\$ 445,900.00
Determinación del Costo Unitario de Producción						
Costo Total de Materia Prima	\$ 6,300,000.00	\$ 7,000,000.00	\$ 7,700,000.00	\$ 8,400,000.00	\$ 9,100,000.00	\$ 9,800,000.00
Costo Total de Mano de Obra	\$ 545,454.00	\$ 606,060.00	\$ 666,666.00	\$ 727,272.00	\$ 787,878.00	\$ 848,484.00
Costo Total de Gastos Indirectos	\$ 286,650.00	\$ 318,500.00	\$ 350,350.00	\$ 382,200.00	\$ 414,050.00	\$ 445,900.00
Gastos Indirectos Fijos	\$ 720,000.00	\$ 720,000.00	\$ 720,000.00	\$ 720,000.00	\$ 720,000.00	\$ 720,000.00
Costo Total de Producción	\$ 7,852,104.00	\$ 8,644,560.00	\$ 9,437,016.00	\$ 10,229,472.00	\$ 11,021,928.00	\$ 11,814,384.00
entre (unidades producidas)	10	10	11	12	13	14
Costo Unitario	\$ 785,210.40	\$ 864,456.00	\$ 857,910.55	\$ 852,456.00	\$ 847,840.62	\$ 843,884.57

Costo Total de Materia Prima						
Unidades Producidas	15	16	17	18	19	20
Costo Unitario de Materia Prima	\$ 700,000.00	\$ 700,000.00	\$ 700,000.00	\$ 700,000.00	\$ 700,000.00	\$ 700,000.00
Costo Total de Materia Prima	\$ 10,500,000.00	\$ 11,200,000.00	\$ 11,900,000.00	\$ 12,600,000.00	\$ 13,300,000.00	\$ 14,000,000.00
Costo Total de Mano de Obra						
Unidades Producidas	15	16	17	18	19	20
Costo Unitario de Mano de Obra	\$ 60,606.00	\$ 60,606.00	\$ 60,606.00	\$ 60,606.00	\$ 60,606.00	\$ 181,818.00
Costo Total de Mano de Obra	\$ 909,090.00	\$ 969,696.00	\$ 1,030,302.00	\$ 1,090,908.00	\$ 1,151,514.00	\$ 3,636,360.00
Costo Total de Gastos Indirectos						
Unidades Producidas	15	16	17	18	19	20
Costo Unitario de Gastos Indirectos	\$ 31,850.00	\$ 31,850.00	\$ 31,850.00	\$ 31,850.00	\$ 31,850.00	\$ 95,550.00
Costo Total de Gastos Indirectos (Mano de Obra, Costos de Ensamble)	\$ 477,750.00	\$ 509,600.00	\$ 541,450.00	\$ 573,300.00	\$ 605,150.00	\$ 1,911,000.00
Determinación del Costo Unitario de Producción						
Costo Total de Materia Prima	\$ 10,500,000.00	\$ 11,200,000.00	\$ 11,900,000.00	\$ 12,600,000.00	\$ 13,300,000.00	\$ 14,000,000.00
Costo Total de Mano de Obra	\$ 909,090.00	\$ 969,696.00	\$ 1,030,302.00	\$ 1,090,908.00	\$ 1,151,514.00	\$ 3,636,360.00
Costo Total de Gastos Indirectos	\$ 477,750.00	\$ 509,600.00	\$ 541,450.00	\$ 573,300.00	\$ 605,150.00	\$ 1,911,000.00
Gastos Indirectos Fijos	\$ 720,000.00	\$ 720,000.00	\$ 720,000.00	\$ 720,000.00	\$ 720,000.00	\$ 920,000.00
Costo Total de Producción	\$ 12,606,840.00	\$ 13,399,296.00	\$ 14,191,752.00	\$ 14,984,208.00	\$ 15,776,664.00	\$ 20,467,360.00
entre (unidades producidas)	15	16	17	18	19	20
Costo Unitario	\$ 840,456.00	\$ 837,456.00	\$ 834,808.94	\$ 832,456.00	\$ 830,350.74	\$ 1,023,368.00

Costo Total de Materia Prima						
Unidades Producidas	21	22	23	24	25	26
Costo Unitario de Materia Prima	\$ 700,000.00	\$ 700,000.00	\$ 700,000.00	\$ 700,000.00	\$ 700,000.00	\$ 700,000.00
Costo Total de Materia Prima	\$ 14,700,000.00	\$ 15,400,000.00	\$ 16,100,000.00	\$ 16,800,000.00	\$ 17,500,000.00	\$ 18,200,000.00
Costo Total de Mano de Obra						
Unidades Producidas	21	22	23	24	25	26
Costo Unitario de Mano de Obra	\$ 181,818.00	\$ 181,818.00	\$ 181,818.00	\$ 181,818.00	\$ 181,818.00	\$ 181,818.00
Costo Total de Mano de Obra	\$ 3,818,178.00	\$ 3,999,996.00	\$ 4,181,814.00	\$ 4,363,632.00	\$ 4,545,450.00	\$ 4,727,268.00
Costo Total de Gastos Indirectos						
Unidades Producidas	21	22	23	24	25	26
Costo Unitario de Gastos Indirectos	\$ 95,550.00	\$ 95,550.00	\$ 95,550.00	\$ 95,550.00	\$ 95,550.00	\$ 95,550.00
Costo Total de Gastos Indirectos (Mano de Obra, Costos de Ensamble)	\$ 2,006,550.00	\$ 2,102,100.00	\$ 2,197,650.00	\$ 2,293,200.00	\$ 2,388,750.00	\$ 2,484,300.00
Determinación del Costo Unitario de Producción						
Costo Total de Materia Prima	\$ 14,700,000.00	\$ 15,400,000.00	\$ 16,100,000.00	\$ 16,800,000.00	\$ 17,500,000.00	\$ 18,200,000.00
Costo Total de Mano de Obra	\$ 3,818,178.00	\$ 3,999,996.00	\$ 4,181,814.00	\$ 4,363,632.00	\$ 4,545,450.00	\$ 4,727,268.00
Costo Total de Gastos Indirectos	\$ 2,006,550.00	\$ 2,102,100.00	\$ 2,197,650.00	\$ 2,293,200.00	\$ 2,388,750.00	\$ 2,484,300.00
Gastos Indirectos Fijos	\$ 920,000.00	\$ 920,000.00	\$ 920,000.00	\$ 920,000.00	\$ 920,000.00	\$ 920,000.00
Costo Total de Producción	\$ 21,444,728.00	\$ 22,422,096.00	\$ 23,399,464.00	\$ 24,376,832.00	\$ 25,354,200.00	\$ 26,331,568.00
entre (unidades producidas)	21	22	23	24	25	26
Costo Unitario	\$ 1,021,177.52	\$ 1,019,186.18	\$ 1,017,368.00	\$ 1,015,701.33	\$ 1,014,168.00	\$ 1,012,752.62

Costo Total de Materia Prima						
Unidades Producidas	27	28	29	30	31	32
Costo Unitario de Materia Prima	\$ 700,000.00	\$ 700,000.00	\$ 700,000.00	\$ 700,000.00	\$ 700,000.00	\$ 700,000.00
Costo Total de Materia Prima	\$ 18,900,000.00	\$ 19,600,000.00	\$ 20,300,000.00	\$ 21,000,000.00	\$ 21,700,000.00	\$ 22,400,000.00
Costo Total de Mano de Obra						
Unidades Producidas	27	28	29	30	31	32
Costo Unitario de Mano de Obra	\$ 181,818.00	\$ 181,818.00	\$ 181,818.00	\$ 181,818.00	\$ 181,818.00	\$ 181,818.00
Costo Total de Mano de Obra	\$ 4,909,086.00	\$ 5,090,904.00	\$ 5,272,722.00	\$ 5,454,540.00	\$ 5,636,358.00	\$ 5,818,176.00
Costo Total de Gastos Indirectos						
Unidades Producidas	27	28	29	30	31	32
Costo Unitario de Gastos Indirectos	\$ 95,550.00	\$ 95,550.00	\$ 95,550.00	\$ 95,550.00	\$ 95,550.00	\$ 95,550.00
Costo Total de Gastos Indirectos (Mano de Obra, Costos de Ensamble)	\$ 2,579,850.00	\$ 2,675,400.00	\$ 2,770,950.00	\$ 2,866,500.00	\$ 2,962,050.00	\$ 3,057,600.00
Determinación del Costo Unitario de Producción						
Costo Total de Materia Prima	\$ 18,900,000.00	\$ 19,600,000.00	\$ 20,300,000.00	\$ 21,000,000.00	\$ 21,700,000.00	\$ 22,400,000.00
Costo Total de Mano de Obra	\$ 4,909,086.00	\$ 5,090,904.00	\$ 5,272,722.00	\$ 5,454,540.00	\$ 5,636,358.00	\$ 5,818,176.00
Costo Total de Gastos Indirectos	\$ 2,579,850.00	\$ 2,675,400.00	\$ 2,770,950.00	\$ 2,866,500.00	\$ 2,962,050.00	\$ 3,057,600.00
Gastos Indirectos Fijos	\$ 920,000.00	\$ 920,000.00	\$ 920,000.00	\$ 920,000.00	\$ 920,000.00	\$ 920,000.00
Costo Total de Producción	\$ 27,308,936.00	\$ 28,286,304.00	\$ 29,263,672.00	\$ 30,241,040.00	\$ 31,218,408.00	\$ 32,195,776.00
entre (unidades producidas)	27	28	29	30	31	32
Costo Unitario	\$ 1,011,442.07	\$ 1,010,225.14	\$ 1,009,092.14	\$ 1,008,034.67	\$ 1,007,045.42	\$ 1,006,118.00

Costo Total de Materia Prima						
Unidades Producidas	33	34	35	36	37	38
Costo Unitario de Materia Prima	\$ 700,000.00	\$ 700,000.00	\$ 700,000.00	\$ 700,000.00	\$ 700,000.00	\$ 700,000.00
Costo Total de Materia Prima	\$ 23,100,000.00	\$ 23,800,000.00	\$ 24,500,000.00	\$ 25,200,000.00	\$ 25,900,000.00	\$ 26,600,000.00
Costo Total de Mano de Obra						
Unidades Producidas	33	34	35	36	37	38
Costo Unitario de Mano de Obra	\$ 181,818.00	\$ 181,818.00	\$ 181,818.00	\$ 181,818.00	\$ 181,818.00	\$ 181,818.00
Costo Total de Mano de Obra	\$ 5,999,994.00	\$ 6,181,812.00	\$ 6,363,630.00	\$ 6,545,448.00	\$ 6,727,266.00	\$ 6,909,084.00
Costo Total de Gastos Indirectos						
Unidades Producidas	33	34	35	36	37	38
Costo Unitario de Gastos Indirectos	\$ 95,550.00	\$ 95,550.00	\$ 95,550.00	\$ 95,550.00	\$ 95,550.00	\$ 95,550.00
Costo Total de Gastos Indirectos (Mano de Obra, Costos de Ensamble)	\$ 3,153,150.00	\$ 3,248,700.00	\$ 3,344,250.00	\$ 3,439,800.00	\$ 3,535,350.00	\$ 3,630,900.00
Determinación del Costo Unitario de Producción						
Costo Total de Materia Prima	\$ 23,100,000.00	\$ 23,800,000.00	\$ 24,500,000.00	\$ 25,200,000.00	\$ 25,900,000.00	\$ 26,600,000.00
Costo Total de Mano de Obra	\$ 5,999,994.00	\$ 6,181,812.00	\$ 6,363,630.00	\$ 6,545,448.00	\$ 6,727,266.00	\$ 6,909,084.00
Costo Total de Gastos Indirectos	\$ 3,153,150.00	\$ 3,248,700.00	\$ 3,344,250.00	\$ 3,439,800.00	\$ 3,535,350.00	\$ 3,630,900.00
Gastos Indirectos Fijos	\$ 920,000.00	\$ 920,000.00	\$ 920,000.00	\$ 920,000.00	\$ 920,000.00	\$ 920,000.00
Costo Total de Producción	\$ 33,173,144.00	\$ 34,150,512.00	\$ 35,127,880.00	\$ 36,105,248.00	\$ 37,082,616.00	\$ 38,059,984.00
entre (unidades producidas)	33	34	35	36	37	38
Costo Unitario	\$ 1,005,246.79	\$ 1,004,426.82	\$ 1,003,653.71	\$ 1,002,923.56	\$ 1,002,232.86	\$ 1,001,578.53

Costo Total de Materia Prima						
Unidades Producidas	39	40	41	42	43	44
Costo Unitario de Materia Prima	\$ 700,000.00	\$ 700,000.00	\$ 700,000.00	\$ 700,000.00	\$ 700,000.00	\$ 700,000.00
Costo Total de Materia Prima	\$ 27,300,000.00	\$ 28,000,000.00	\$ 28,700,000.00	\$ 29,400,000.00	\$ 30,100,000.00	\$ 30,800,000.00
Costo Total de Mano de Obra						
Unidades Producidas	39	40	41	42	43	44
Costo Unitario de Mano de Obra	\$ 181,818.00	\$ 181,818.00	\$ 181,818.00	\$ 181,818.00	\$ 181,818.00	\$ 181,818.00
Costo Total de Mano de Obra	\$ 7,090,902.00	\$ 7,272,720.00	\$ 7,454,538.00	\$ 7,636,356.00	\$ 7,818,174.00	\$ 7,999,992.00
Costo Total de Gastos Indirectos						
Unidades Producidas	39	40	41	42	43	44
Costo Unitario de Gastos Indirectos	\$ 95,550.00	\$ 95,550.00	\$ 95,550.00	\$ 95,550.00	\$ 95,550.00	\$ 95,550.00
Costo Total de Gastos Indirectos (Mano de Obra, Costos de Ensamble)	\$ 3,726,450.00	\$ 3,822,000.00	\$ 3,917,550.00	\$ 4,013,100.00	\$ 4,108,650.00	\$ 4,204,200.00
Determinación del Costo Unitario de Producción						
Costo Total de Materia Prima	\$ 27,300,000.00	\$ 28,000,000.00	\$ 28,700,000.00	\$ 29,400,000.00	\$ 30,100,000.00	\$ 30,800,000.00
Costo Total de Mano de Obra	\$ 7,090,902.00	\$ 7,272,720.00	\$ 7,454,538.00	\$ 7,636,356.00	\$ 7,818,174.00	\$ 7,999,992.00
Costo Total de Gastos Indirectos	\$ 3,726,450.00	\$ 3,822,000.00	\$ 3,917,550.00	\$ 4,013,100.00	\$ 4,108,650.00	\$ 4,204,200.00
Gastos Indirectos Fijos	\$ 920,000.00	\$ 920,000.00	\$ 920,000.00	\$ 920,000.00	\$ 920,000.00	\$ 920,000.00
Costo Total de Producción	\$ 39,037,352.00	\$ 40,014,720.00	\$ 40,992,088.00	\$ 41,969,456.00	\$ 42,946,824.00	\$ 43,924,192.00
entre (unidades producidas)	39	40	41	42	43	44
Costo Unitario	\$ 1,000,957.74	\$ 1,000,368.00	\$ 999,807.02	\$ 999,272.76	\$ 998,763.35	\$ 998,277.09

Bibliografía

- Aguirre, A., Müller, E., & Sebastian, S. (2008). APPLYING A SIMULATION-BASED TOOL TO PRODUCTIVITY MANAGEMENT. *Winter Simulation Conference*, (págs. 1-9).
- Altemdorfer, K., Felberbauer, T., Gruber, D., & Hübl, A. (2013). APPLICATION OF A GENERIC SIMULATION MODEL TO OPTIMIZE PRODUCTION AND WORKFORCE PLANNING AT AN AUTOMOTIVE SUPPLIER. *Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference*, 1-9.
- Amaran, S. S. (2016). Simulation optimization: a review of algorithms and applications. *Annals of Operations Research*, 351-380.
- AMIA. (15 de Octubre de 2016). *Asociación Mexicana de la Industria Automotriz*. Obtenido de Sitio web de Asociación Mexicana de la Industria Automotriz: <http://www.amia.com.mx/>
- Arigues, C., Belmokhtar, S., & Feillet, D. (2004). A New Exact Solution Algorithm for the Job Shop Problem with Sequence-Dependent Setup Times. *Integration of AI and OR Techniques in Constraint Programming For Combinatorial Optimization Problems*, 37-49.
- Artigues, C., Belmokhtar, S., & Feillet, D. (2003). New Exact Solution Algorithm for the Job. Cedex, France.
- Artingues, C., & Feillet, D. (2007). A Branch and Bound method for the Job Shop Problem with Sequence-dependent setup times. *Operational Research*.
- Barra, M. J., & Ferreira, A. (2007). APPLICATION OF DESIGN OF EXPERIMENTS ON THE SIMULATION. *Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference*, (págs. 1601-1609). Brazil.
- Barton, R. (2010). Simulation Experiment Design. *Winter Simulation Conference*, (págs. 75-86). Pennsylvania.
- Bautista, J., & Fortuny-Santos, J. (2012). Improving "Just-in-Time, just-in-sequence" delivery in first-tier supplier. *2015*, 1-20.
- Bergen, M., Van Beek, P., & T., C. (2001). Constraint-based vehicle assembly line. *Proceedings of the 14th Canadian Conference on Artificial Intelligence*, (págs. 88-99). Canada .
- Brucker, P., Jurish, B., & Sievers, B. (1994). A branch and Bound algorithm for the Job Shop Scheduling Problem. *Discrete Applied Mathematics*, 107-127.

- Burbano Arias, J. F. (31 de 10 de 2011). *Biblioteca Digital Universidad del Valle Santiago de Cali*.
Obtenido de Tesis : <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/4158/4/CB-0441150.pdf>
- Carro Paz, R., & González Gómez, D. (2004). Capacidad y distribución física. *Administracion de las operaciones*, 2-3.
- Chase, R. B., Jacobs, F., & Aquilano, N. (2010). *Administración de operaciones*. México: McGraw-Hill.
- Cheng, J., Lu, Y., & Puskorius. (1999). Vehicle sequencing based on evolutionary computation. *In Evolutionary Computation (CEC 99)*, 1207-1214.
- Cluster Automotriz de Nuevo León, A. (2016). *Cluster Automotriz de Nuevo León, A.C.* Obtenido de Cluster Automotriz de Nuevo León, A.C.: <http://www.claut.com.mx/>
- Corichi, G. A., & Cerón, I. A. (9 de Septiembre de 2000). *Analisis de tendencias de estrategias de productos*. Obtenido de https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/icea/LI_PosOrgMerc/alejandra_corichi/1.pdf: https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/icea/LI_PosOrgMerc/alejandra_corichi/1.pdf
- Cusumano, M. (1989). *The Japanese Automobile Industry: Technology and Management at Nissan and Toyota*. Estados Unidos: The Council on East Asian Studies, Harvard University.
- De la Garza, E. (15 de 11 de 1994). <http://sgpwe.izt.uam.mx/pages/egt/congresos/mpytenm.pdf>. Obtenido de <http://sgpwe.izt.uam.mx/pages/egt/congresos/mpytenm.pdf>
- Detty, R. B., & C., Y. J. (2000). Quantifying benefits of concersion to lean manufacturing with discrete event simulation: a case study. *International journal of production research*, 429-445.
- Ding, F., & H, S. (2004). Sequencen alteration and restoration related to sequenced parts delivery on an automobile mixed-model assembly line with multiple departments. *International Journla Production Research*, 1525-1543.
- Dosi, A. (1988). Technical change and economic theory. En D. E. al. New York: Pinter Publishers.
- Drexl, A., & Kimms, A. (2001). Sequencing jit mixed-model assembly lines under station. *Management Science*, 480-491.
- Drexl, A., & Kimms, A. (2006). Algorithms for the car sequencing and. *Journal of Scheduling*, 2.
- Duannmu, J., & Taaffe, K. (2007). MEASURING MANUFACTURING THROUGHPUT USING TAKT TIME ANALYSIS AND SIMULATION. *Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference*, (págs. 1-8). USA.

- economista, E. (1 de marzo de 2005). *El economista*. Obtenido de El economista:
<http://eleconomista.com.mx/estados/2015/03/01/sector-automotriz-invertira-nuevo-leon-2000-mdd>
- Enfasis Logistica. (13 de 03 de 2015). *Enfasis Logistica*. Obtenido de Enfasis Logistica:
<http://www.logisticamx.enfasis.com/>
- Eppen, G., Gould, F., Schmidt, Moore, J., & Watherford, L. (2000). Investigación de operaciones en la ciencia administrativa. En G. Eppen, F. Gould, Schmidt, J. Moore, & L. Watherford. Pearson.
- Fernandez-Baños Marín, I. (Diciembre de 2003). <https://upcommons.upc.edu>. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu>: <https://upcommons.upc.edu>
- Focacci, F., Laborie, P., & Nuijten, W. (2000). Solving Scheduling Problems with Setup Times and Alternative Resources. *AIPS*, 1-10.
- Freyssenet, M., & Boyer, R. (2003). Los modelos proctivos . Madrid: Fundamentos.
- Gadinaik, Y., & Bilolikar, S. (2014). Simulation based analysis of job shop manufacturing planning., (págs. 1-10). C R College of Engg. Mumbai.
- Giannasi, E. (2012). Desperdicios en la Produccion . *Instituto Nacional de Tecnologia Industrial* , 8.
- Gonzáles Vicente, A. F. (2003). BUFFERS DE PROGRAMACIÓN: UNA ESTRATEGIA COMPLEMENTARIA PARA. *Revista ingenieria de construccion* , 109-119.
- Gottlieb, J., Puchta, M., & C., S. (2003). A study of greedy, local search and ant colony optimization approaches for car sequencing problems. *In Applications of evolutionary computing*, 246-257.
- Gravel, M., C., G., & W.L., P. (2005). Review and comparison of three methods for the solution of the car-sequencing problem. *Journal of the Operational Research Society*, 1287-1295.
- Hariri, A., & Potts, C. (1991). A Branch and Bound Algorithm for Job Shop´Scheduling. *J.K.A.U. Sci*, 201-209.
- Harrell, C., Ghosh, B., & Bowden, R. (2004). Simulation using promodel. En *Simulation using promodel* (pág. 223). Mc Graw Hill.
- Hernández Sampieri, R. e. (2014). *Metodología de la Investigación*. México D.F.: McGraw-Hill.
- Hoeve, V. (2006). Revisiting the sequence constraint. *In 12th International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming*, (págs. 620-634).

- Hoffmeister, F., & Bäck, T. (1991). Genetic Algorithms and Evolution Strategies: Similarities and Differences, in *Parallel Problem-Solving from Nature*. Springer-Verlag, 455-471.
- Holland. (1975). Adaptation in natural and artificial systems. *University of Michigan Press*, 1-12.
- I.P., G., & T., W. (Septiembre de 1999). *a benchmark library for constraints*. Technical report. Obtenido de a benchmark library for constraints. Technical report: <http://www.csplib.org/>.
- Industria Nacional de Autopartes, A.C. (13 de Abril de 2017). *Industria Nacional de Autopartes, A.C.* Obtenido de Industria Nacional de Autopartes, A.C.: <https://www.ina.com.mx/>
- Islamoglu, E. N., Ryu, K., & Ilkyeong, M. (2014). Labor productivity in modular assembly: a study of automotive module suppliers. *International Journal of Production Research*, 6954-6970.
- Ismail, N., Tai, S., & Leman, Z. (2002). Improving Productivity and Efficiency of a Vehicle Seat Assembly Line in A Manufacturing Company. *Student Conference on Research and Development Proceedings*, (págs. 94-98). Malaysia.
- Jara, L. (3 de Noviembre de 2015). <http://www.observatorio.unr.edu.ar/utilizacion-de-la-capacidad-instalada-en-la-industria-2/>. Obtenido de <http://www.observatorio.unr.edu.ar/utilizacion-de-la-capacidad-instalada-en-la-industria-2/>
- Jararaman, A., & Ali, G. (1997). APPLICATIONS OF DISCRETE EVENT SIMULATION IN THE DESIGN OF AUTOMOTIVE. *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference*, (págs. 758-764). Michigan, USA.
- Jayaraman, A., & Gunal, K. A. (1997). Applications of Discrete Event Simulation in The Design of Automotive Powertrain Manufacturing Systems. *Winter Simulation Conference*. Dearborn, Michigan U.S.A.: Production Modeling Corporation.
- Joly, A., & Frein, Y. (2008). Heuristics for an industrial car sequencing problem considering paint and assembly shop objectives. *Computer and Instrual Engineering*, 295-310.
- Käfer, R. (2007). Advantages and disadvantages of a Just in time/Just in secuence production. *10th Doctorate Conference* , (págs. 1-2). Herlay.
- Khalil-El, R. (2015). Simulation analysis for managing and improvine productivity: A case study of an automotive company. *Journla of Manufacturing Technology Management*, 36-56.
- Krajewski, L., L., R., & M., M. (2011). Administración de operaciones Procesos y cadenas de valor. Pearson Prentice Hall.
- Krystek, J., & Sara, A. (2016). THE ROLE OF BUFFER WAREHOUSES IN SELECTED. *International Conference on Industrial ICIL 2016 Logistics*, (págs. 119-126). Zakopane, Poland.

- Lee, J. (1998). Performance of a comprehensive and efficient constraint library using local search. *In 11th Australian JCAI, LNAI*. Australia: Springer, Verlag.
- Lorenc, A., & Szkoda, M. (2016). Impact of a just-in-sequence system on the effectiveness of internal transport in automotive industry. *International conference on industrial logistics*, 168-177.
- Manufactura. (03 de Octubre de 2016). *Manufactura*. Obtenido de <http://www.manufactura.mx/automotriz/2016/10/03/inauguran-el-parque-de-proveedores-de-audi>
- Mastrolilli, M., & Gambardella, L. (1998). Effective Neighborhood Functions for the Flexible Job Shop Problem. *IDSIA*, 1-36.
- Meissner, S. (2010). Controlling just-in-sequence flow-production. *Logistic Research*, 45-53.
- Mejía, C. C. (3 de Julio de 2013). http://www.planning.com.co/bd/valor_agregado/Julio2013.pdf. Obtenido de http://www.planning.com.co/bd/valor_agregado/Julio2013.pdf
- Mercedes-Benz Corporation Mexico. (20 de Mayo de 2018). *Mercedes-Benz*. Obtenido de <http://autobusesmercedesbenz.com.mx/>
- Merwe, V. d. (Octubre de 2010). Optimizing the S.S.A.Ratio Level Indexes of the PBS process in. Pretoria.
- Miller, S., & Dennis, P. (2000). Introduction to Manufacturing Simulation. *In Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*, (págs. 63-66).
- Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva. (2014). El futuro del Sector Automotriz en el Mundo (2025). *Tecnología e Innovación Productiva*, 10-17.
- Mongelli, M. A., & Monteiro de Carvalho, M. (2006). Applying virtual simulation in automotive. *International Conference on Operations and Global Competitiveness* (págs. 79-85). EurOMA.
- Mucientes, M., Vida, J., Bugarin, A., & Manuel, L. (2008). Processing times estimation in a manufacturing industry through. *3rd International Workshop on Genetic and Evolving Fuzzy Systems*, (págs. 95-100). Germany.
- Nakata, S. (2014). *Costos y desperdicios de material*. Instituto Universitario Politécnico "Santiago Mariño".
- Ohno, T. (1988). *Toyota Production System: Beyond Large Scale Production*. Cambridge: Productivity Press.

- OICA. (17 de Marzo de 2017). *International Organization of Motor Vehicle Manufacturers*.
Obtenido de International Organization of Motor Vehicle Manufacturers: www.oica.net
- Om Kumar, M., & Shahabuddin, P. (2006). Ant Colony Optimization for Multilevel Assembly Job Shop Scheduling. *The International Journal of Applied Management and Technology*.
- Onur, Ü. M., & Upendram, S. S. (1994). Productivity Simulation in the Automotive Industry. *Production Modeling*, 50-62.
- Parello, B., Kabat, W., & L., W. (1986). Job-shop scheduling using automated reasoning: a case study of the car sequencing problem. *Journal of Automated Reasoning*, 1-42.
- Pedro, S. M., & Echávarri Yepes, R. (2009). Dimensionado óptimo de buffers con metodología kanban sin tarjetas. *Industrial Engineering and Industrial Management*, (págs. 1745-1753). Barcelona.
- Pereira, R. (16 de Diciembre de 2016).
<https://www.gembaacademy.com/blog/es/2016/12/16/que-son-y-como-calcular-el-tiempo-de-ciclo-cycle-time-takt-time-y-tiempo-de-espera-lead-time-1>.
- Perron, L., & Shaw, P. (2004). Combining forces to solve the car sequencing problem. *In Proceedings of CP-AI-OR'2004*, 225-239.
- Phani, K., Kamala, V., & ACS., K. (2013). Simulation Of Job Shop Scheduling Problem. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 1-4.
- Pineda, M. (11 de 01 de 2017). <http://www.mms-mexico.com/>. Obtenido de <http://www.mms-mexico.com/>: <http://www.mms-mexico.com/art%C3%ADculos/la-industria-automotriz-mexicana-y-sus-desaf%C3%ADos-para-2017>
- Promodel Corporation. (22 de Septiembre de 2010). User Guide Promodel. *User Guide Promodel*. United States of America: Promodel Corporation.
- Puchta, M., & Gottlieb, J. (2002). Solving car sequencing problems by local optimization. *In EvoWorkshops*, 132-142.
- Quingsong, L., & QU, D. (2009). Simulation and Optimization of Discrete Customized Job-shop Scheduling. *Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, (págs. 213-215). China.
- Raychudhuri, S. (2008). Introduction to Monte Carlo Simulation. *Winter Simulation Conference*, (págs. 91-100).
- Reeves, C. R. (1997). Feature Article—Genetic Algorithms for the Operations Researcher. *INFORMS Journal on Computing*, 231-250.

- Regin, J., & J.F., P. (1997). A filtering algorithm for global sequencing constraints. 32-46.
- Rybicka, J., Ashutosh, T., & Shane, E. (2016). Testing a Flexible Manufacturing System Facility Production Capacity through Discrete Event Simulation: Automotive Case Study. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 690-694.
- SELECTED, T. R. (2016). KRYSTEK, Jolanta; ALSZER, Sara. *International Conference on Industrial Logistics* (págs. 119-127). Zakopane, Poland: ICIL 2016.
- Smith, B. (1996). Succeed-first or fail-first: A case study in variable and value ordering. *In third Conference on the Practical Applications of Constraint Technology* , (págs. 321-330).
- Solnon, C. (2000). Solving permutation constraint satisfaction problems with artificial ants. *In Proceedings of ECAI'2000* (págs. 118-122). Amsterdam, The Netherlands: IOS Press.
- Solnon, C., & Dat Cung Van, N. A. (2005). The car sequencing problem: overview of state-of-the-art methods. 1-22.
- Solnon, C., Dat Cung, V., Nguyen, A., & Artigues, C. (2005). The car sequencing problem: overview of state-of-the-art methods and industrial case-study of the ROADEF 2005 challenge problem. 1-22.
- Sun, L., Cheng, X., & Liang, Y. (2010). Solving Job Shop Problem Using Genetic Algorithm with Penalty Function. *International Journal of Intelligent Information Processing*.
- The Boston Consulting Group. (2015). Industry 4.0 The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries. *The Boston Consulting Group*, 2-16.
- Thun, J.-H., Marble, R. P., & Silveira-Camargos, V. (2007). A conceptual framework and empirical results of the risk and potential of just in sequence - A study of the German Automotive Industry. *Journal of operations and Logistics*, 1-12.
- Tiacci, L., & Saetta, S. (2007). Process-oriented simulation for mixed-model assembly lines . 1-7.
- Trakultogchai, A., Supsomboon, S., & Limtanyakul. (2013). Process Simulation and Improvement of Automotive Paint Shop. *International Journal of Mining, Metallurgy & Mechanical Engineering (IJMMME)*, 1-4.
- Tsang, E. (1993). Foundations of constraint satisfaction. *Academic Press*.
- Ülgen, O. M., & Upendram, S. S. (1995). Productivity simulation in the automotive industry. *Production modeling corporation*, 1-5.
- Ulgen, O., & Ali, G. (1989). Simulation in the Automobile Industry. 547-570.

- Ulgen, O., & Ali, G. (1998). Simulation in the Automobile Industry. En J. Banks, *Handbook of Simulation* (págs. 547-569). John Wiley & Sons.
- Vajasuvimon, A., & Supsomboon, S. (2014). Simulation of production plan and management for job shop production system. *International Conference ResearchWorld Press*, (págs. 73-78). Bangkok, Thailand.
- Valero, H. M., Garcia, S. J., Coronado, R., & Hernandez, J. (2011). Planteamiento dinámico del problema de secuenciación en líneas de montaje con mezcla de modelos. *5th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management*, (págs. 1-9).
- Van der Merwe, S. (2010). Optimizing the S.S.A Ratio Leven Indexes of the PBS process in Nissan's Production Plant. *Optimizing the S.S.A Ratio Leven Indexes of the PBS process in Nissan's Production Plant*. University of Pretoria.
- Vicencio, M. A. (Abril de 2007). *Revista Electronica de Contaduria y Administración*. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-10422007000100010
- Wagner, M. S., & Victor, S.-C. (2012). Managing Risks in Just-In-Sequence Supply Networks: Exploratory Evidence From Automakers. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 1-12.
- Warwick, T., & Tsang, E. (1995). Tackling car sequencing problems using a genetic algorithm. *Journal of Evolutionary Computation*, 267-298.
- Wirabhuaana, A., Haron, H., & M., R. (2008). Simulation and Re-engineering of Truck Assembly Line. *Second Asia International Conference on Modelling & Simulation*, (págs. 783-787). Malasia.